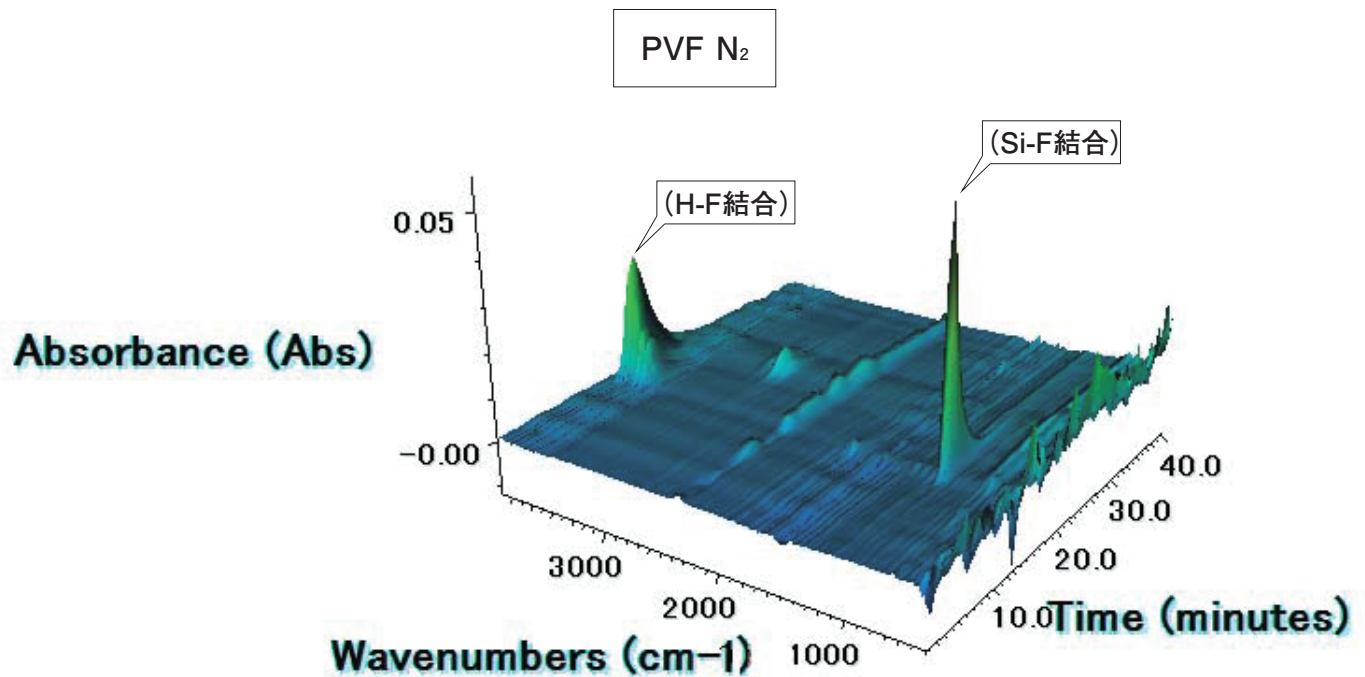
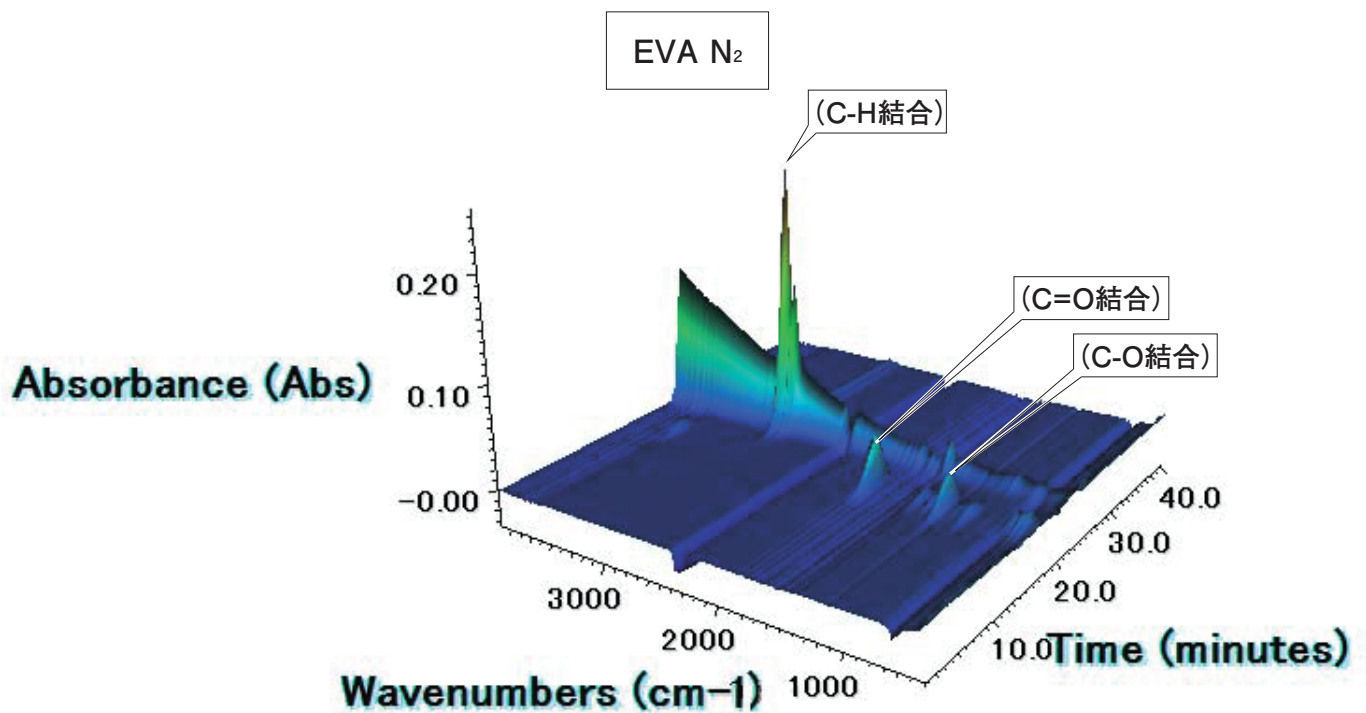
ISSN　0426－2700

消防研究所報告

通　巻　116号　　　2014年3月

Report of National Research Institute of Fire and Disaster

No.116　March 2014

太陽電池モジュール燃焼時の生成ガスについて
Degradation gas at the time of combustion of a photovoltaic generation module constituent material

N_2 中での PVF の分解挙動　　本文 4 ページ参照
Decomposition behavior of PVF in nitrogen atomosphere.　See also page 4.

N_2 中での EVA の分解挙動　　本文 6 ページ参照
Decomposition behavior of EVA in nitrogen atomosphere.　See also page 6.

消防活動時の太陽電池モジュールの感電危険性
Electric Shock with Photovoltaic Modules on the Fire Fighting

破壊する単結晶シリコンモジュールを含めモジュール 15 枚を並べた実験装置　本文 19 ページ参照
Experimental apparatus consists of the 15 monocrystal silicon photovoltaic modules including one module for destruction. See also page 19.

万能斧③ による単結晶シリコンモジュールの破壊。矢印の先に眩光が見える。　本文 20 ページ参照
Destruction of the monocrystal silicon photovoltaic module by the fire ax.
The bright light was observed at the point showed by the arrow. See also page 20.

目　　次

— Contents —

技術報告

太陽電池モジュール燃焼時の生成ガスについて

塚目　孝裕、阿部　伸之、田村　裕之、松島　早苗、
尾川　義雄、高梨　健一、河関　大祐、志水　裕昭

（平成 26 年 2 月 4 日　受理）

近年急速に普及している太陽光発電システムに関して、火災時における発電特性、構成部材による破損形態、消防活動時における感電危険性などについて、いくつかの報告がなされている。その中でも構成部材については、近年の技術開発やメーカーの工夫によって種々の材料が使用されており、その種類が多いために燃焼時の生成ガスに関して系統的に検討された知見はほとんどない。本研究では、構成部材単体での加熱分解挙動と生成ガスの確認、またそれらの生成メカニズム、及び実際に太陽電池モジュールを燃焼させた際に発生するガスの相関について検討した。

1．はじめに

太陽光発電システムは発電効率を向上させるための技術的進歩や、電力買取などの政策的な後押しから一般住宅にも普及が進んでいる。また、大容量の発電が可能であるメガソーラーの建設も各地で進んでいる。しかし、このシステムが火炎を受けた時の感電や燃焼生成ガスの危険性などに関しては、知見がない。我々は、火災時の火炎による発電挙動、及び太陽電池モジュール（以下モジュールと呼ぶ）本体が火炎を受けた場合の発電挙動について、既報により報告しているが[*1, 2)]、本報ではモジュールの構成部材から燃焼により生成するガスを中心に、示差熱熱重量分析（Thermogravimetry and Differential thermal analysis）ー赤外分光分析装置（Infrared spectrometer）（以下、TG-IR）、及び質量分析装置（Mass spectrometer）（以下、MS）により考察したので報告する。

2．試料

2.1　使用モジュール

使用したモジュールは、既報[*1)]での燃焼実験に用いた 2 種類のモジュール A 及び B の燃え残った部分を実験に使用した。メーカー及び型式を以下の表1に示す。

表１　使用モジュールの仕様

	Photovoltaic modules	
	A	B
Manufacture	Kyocera Corp.	Sharp Corp.
Model	KC80S	ND-114CA
W(mm) × H(mm)	979 × 656	990 × 856
Normal maximum output(W)	80	114
Normal maximum voltage(V)	16.9	15.2
Normal maximum current(A)	4.73	7.52
Maximum system voltage(V)	600	600

2.2　使用モジュールの構造

モジュールにおいて、燃焼の可能性のある材質はその構造から封止材とバックシートに使用されている高分子化合物である。封止材の材質は、エチレンー酢酸ビニル共重合体が一般に用いられているが、バックシートの材質は多種にわたっており、使用されている材質によって燃焼状態や発生ガスが異なる。モジュールの構造を顕微鏡下で観察し、使用されている各構成部材の材質を赤外分光光度計により測定して特定した。各モジュールの構造と、その材質及び色を以下の表２に示す。表中に使用した略語は以下のとおりである。

表２　各モジュールの構成

	Photovoltaic modules	
	A	B
1st Layer	Glass（clear）	Glass（clear）
2nd Layer	EVA（clear）（including Si cells）	EVA（clear）（Including Si cells）
3rd Layer	EVA（white）	EVA（clear）
4th Layer	PVF（white）	PET（black）
5th Layer	Aluminium（silver）	PET（clear）
6th Layer	PVF（white）	ー

EVA：エチレン－酢酸ビニル共重合体 (Ethylene-vinylacetate copolymer)

PVF：ポリフッ化ビニル (Polyvinyl fluoride)

PET：ポリエチレンテレフタレート (Polyethylene terephthalate)

3．実験経過

3.1　モジュール構成材料の加熱分解実験

構成部材の加熱分解挙動と、その際に生じるガスを検査するために、構成部材単体での生成ガス測定を行い、更にそれらの部材を組み合わせて作成されているモジュール全体について炎による燃焼実験を行った。

モジュール A 及び B の焼け残っている部分を本体から一部採取し、それぞれ材質の異なる層（モジュール A の第 3 層及び第 6 層、モジュール B の第 4 層及び第 5 層）を顕微鏡下で分離して切り出し、TG-IR により測定した。ただし、モジュール B の第 4 層、第 5 層については、接着が強いことと厚みが薄いため分離できず、2 層同時に測定した。測定機器及び測定条件は表3のとおりである。

TG は、試料を一定の速度で加熱し、温度に対応した試料重量変化を測定するものである。一般に高分子化合物は、化合物ごとのある一定温度で分解し、重量が減少する。分解生成物は低分子量のガスであり測定装置外へ排出される。即ち測定対象物の加熱分解温度が分かる。DTA は、試料の吸発熱をとらえることができ、試料の重量変化が吸熱反応であるか発熱反応であるかということを、重量変化である TG と同時に測定できるものである。TG/DTA は単独でも測定化合物の熱物性についての情報が得られるが、分解と同時に生成する低分子量のガスを化合物同定能力の高い IR に導入することで、どのような分解生成物が生じているかを検討し、TG/DTA で測定している対象物が、どのようなメカニズムにより分解しているのかをより詳細に検討できる利点がある。更に、TG の測定雰囲気を窒素と空気により別々に測定することで、窒素中では不活性雰囲気中での化合物の加熱分解挙動が、空気中では酸素存在下での化合物の酸化分解、又は分解生成物の酸化反応をとらえることができる。

表３　測定機器及び条件（TG-IR）

TG/DTA	
Instruments	Hitachi Hi-Tech Science Corp. TG/DTA/7200
Temp. range	Room temperature ～ 600℃
Heating rate	20℃ /min
Atmosphere	Nitrogen, Air (100mL/min)
Sample weight	1.22 ～ 3.30mg
Ref. material	Al2O3（4.08mg）
IR	
Instruments	Thermofisher Scientific K.K. Fourier transform infrared spectrophotometer Model iS10 Attached TGA accessory
Detector	TGS
Number of scan	32 times
Interval of spectrum correction	41 sec

3.2　モジュールの燃焼実験

ジュール A 本体及びモジュール B の一部切り取ったものを消防研究センター・ルームカロリー試験室において燃焼させ、その際に生成するガスを MS により採取し検査した。燃焼させている様子を図1、図2に、使用した装置及び測定条件を表4に示す。モジュールの燃焼はルームカロリー試験室で行ったため、可動型である下記 MS のみを生成ガス測定に使用した。質量分析装置は、いろいろな検出法が存在するが、今回使用した機器は、水銀・キセノンを用いた弱いイオン化法を採用しており、主に機器に導入された化合物の分

図１　モジュール A を燃焼させている状態

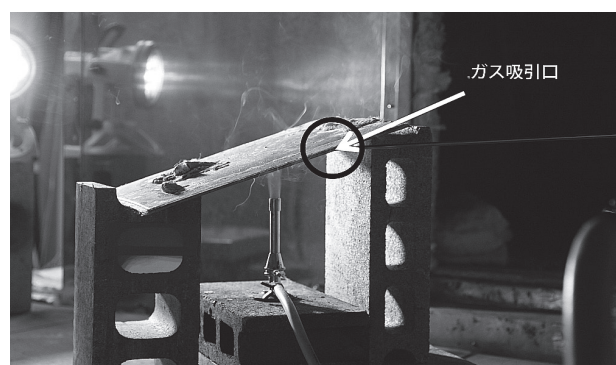



図２　モジュール B を燃焼させている状態

表4　使用機器及び測定条件（MS）

Instruments	V&F Analyse - und Messtechnik GmbH Ion-Molecule Reaction - Mass Spectrometer Air Sence	
Ionization method	Ion molecule reaction method	
Primary ion	Hg^+, Xe^+	
Measured masses		
Molecular weight	Possible compounds	
	Name	Formula
16	methane	CH_4
26	acetylene	C_2H_2
42	propylene	C_3H_6
54	butadiene	C_4H_6
58	propanal	C_3H_6O
60	acetic acid	$C_2H_4O_2$
72	butanal	C_4H_8O
	pentane	C_5H_{12}
78	benzene	C_6H_6
86	pentanal	$C_5H_{10}O$
	hexane	C_6H_{14}
92	toluene	C_7H_8
100	hexanal	$C_6H_{12}O$
	heptane	C_7H_{16}
104	styrene	C_8H_8
122	benzoic acid	$C_7H_6O_2$

子イオンを生じさせ、検出するものである。同一分子量を持つ化合物は多数あるため、分子イオンによる検出は、分子を壊して検出するイオン化法よりは同定能力は低くなる。しかし、燃焼部位付近にガス吸引口を設置し、燃焼で生じた混合したガス全体を分離せず同時に検出する場合は、分子イオンによる解析が有効となる。

測定質量数は、表2に示した材質から、燃焼ガスとして発生する可能性のある物質を推定し、選択イオンモニタリング法で測定した。また、加熱源としてブンゼンバーナーによる都市ガスの炎を使用した。

同時に、モジュール表面温度を赤外線サーモグラフィー装置（日本アビオニクス社製TVS-500）により放射率1.00として測定した。

4．結果と考察

4.1　TG-IRによる構成部材単体の測定結果

4.1.1　PVFの窒素及び空気中での加熱分解

モジュールA第6層のPVFについて、窒素雰囲気下で測定した示差熱－熱重量曲線（以下TG-DTA曲線と呼ぶ）を図3に示す。

窒素雰囲気下では、約250℃（13分）から第1段階の減量が始まり、この減量が穏やかになる約390℃（19分）から第2段階の減量が続いて起こっている。一方、試料の熱の出入りを示すDTA曲線は、穏やかな変化はあるが、顕著な吸発熱のピークは認められない。TG-DTA曲線と同時に測定しているIRスペクトルで、400cm^{-1}から4000cm^{-1}の範囲での総吸収強度を時間に対してプロットしたものを図4に示す。IR吸収を持つ化合物は、約13分より発生し、16分をピークとしていったん減少する。その後、21分から再び増加し、24分をピークとして減少し、その後IR吸収を持つ化合物の生成はない。この増減は、TG曲線の第1段階減量、第2段階減量とよく一致している。この両者から、窒素中でPVFは2段階のメカニズムを経て最終的に分解することを示している。

総吸収強度プロットの2つのピーク位置での赤外吸収スペクトル（以下IRスペクトルと呼ぶ）を図5に示す。16分のピーク位置のIRスペクトルは、3500cm^{-1}から4000cm^{-1}に現れている一連の吸収からフッ化水素（HF）と、1030cm^{-1}付近に現れている四フッ化ケイ素（SiF4）の混合スペクトルであり、24分のピーク位置のIRスペクトルは、フッ化水素と2800cm^{-1}から3000cm^{-1}、及び1400cm^{-1}付近のC-H吸収から炭化水素の混合スペクトルと認められた。また、共に

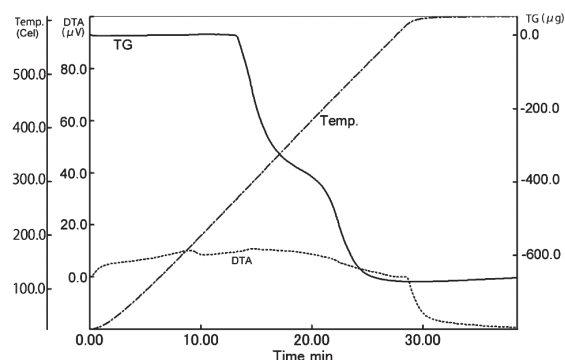



図3　TG-DTA曲線（窒素中モジュールA第6層）

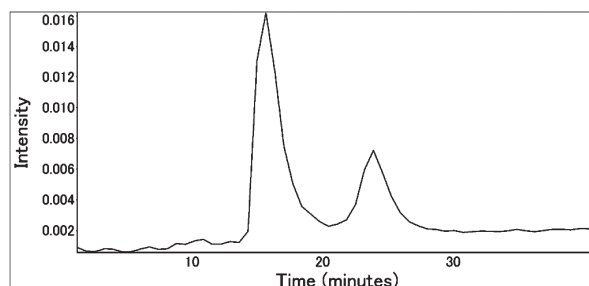



図4　総赤外吸収スペクトルの時間変化（窒素中モジュールA第6層）

2400cm^{-1} 付近に CO_2 の吸収が認められるが、CO_2 は分子吸光係数が大きく、空気中の CO_2 を検出してしまうことが多いため、評価の対象からは除外した。

総測定時間中の各波数の吸収強度を、時間、波数、強度で 3 次元表示したものを図6に示す。測定時間内では 13 分から 20 分にかけてのフッ化水素及び四フッ化ケイ素の強い吸収と 20 分から 27 分にかけての炭化水素の吸収のみしか顕著な吸収は見られない。

これらから、窒素中での PVF の分解挙動は、温度上昇と共に置換基の脱離、直鎖の切断と図7に示すように進むことが確認された。この分解様式は、同一のモノマーを重合させたビニル化合物のホモポリマーで報告されている様式と同様である。

次に、モジュール A 第 6 層の PVF を空気雰囲気下で測定した TG-DTA 曲線を図8に示す。

約 250℃からの第 1 段階減量、約 420℃からの第 2 段階減量と、2 回の減量は窒素雰囲気中と同様の挙動を示している。

IR の総吸収強度のプロットを図9に示す。窒素雰囲気下と同様に 2 つのピークが認められ、これぞれのピークは TG 曲線の第 1 段減量、第 2 段減量に対応している。また、各減量に対応して、DTA 曲線に強い発熱ピークが認められ、空気中での燃焼分解を起こしていると考えられる。

2 つのピーク位置での赤外吸収スペクトルを図 10 に示す。15 分のピークは窒素雰囲気下と同様に HF と SiF4 のスペクトルであるが、25 分のピークは窒素雰囲気下で見られた炭化水素の吸収が認められず、二酸化炭素の吸収のみであった。総測定時間中の各波数の吸収強度を、時間、波数、強度で 3 次元表示したものを図 11 に示す。測定時間内では 13 分から 16 分にかけての HF と SiF4 の強い吸収と 20 分から 28 分にかけての二酸化炭素の吸収のみしか顕著な吸収は見られない。即ち、HF 脱離後の主鎖は、空気中の酸素による酸化分解又は分解と同時に酸化が起こっており、二酸化炭素に変化していると考えられる。

これより PVF は、火災時の火炎中においては約 300℃で HF の生成が予想され、HF 脱離後は、酸化分解又は分解と同時の酸化により、二酸化炭素の生成が予想される。

図 5　約 16 分のピークでの IR スペクトル（上段）と約 24 分のピークでの IR スペクトル（下段）

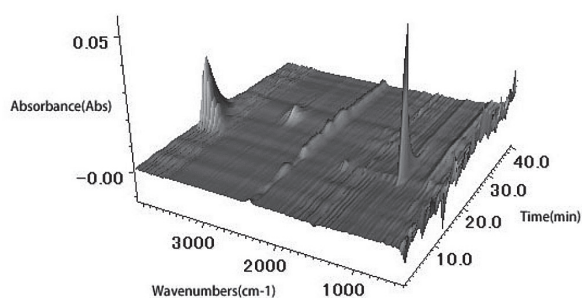



図 6　測定時間に応じた各波数吸収とその強度（窒素中モジュール A 第 6 層）

図 7　PVF の分解挙動

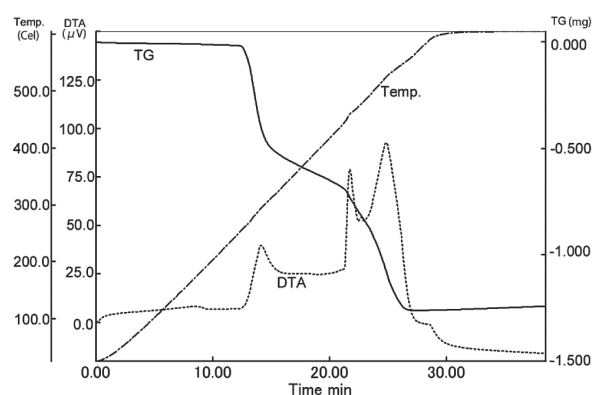



図 8　TG-DTA 曲線（空気中モジュール A 第 6 層）

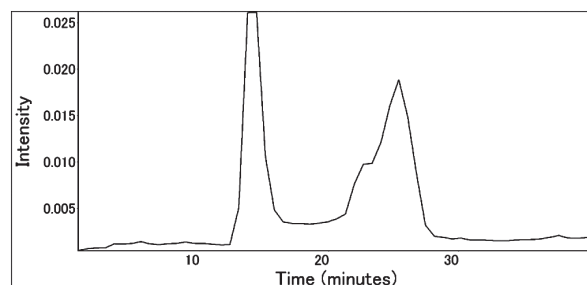



図 9　総赤外吸収スペクトルの時間変化（空気中モジュール A 第 6 層）

SiF_4は、PVFからは生成しないが、PVF中に充填剤としてケイ素を含む化合物が含有されているか、太陽電池に用いられているケイ素が混入した可能性がある。

4.1.2　EVAの窒素及び空気中での加熱分解

モジュールA第3層のEVAについて、窒素雰囲気下で測定したTG-DTA曲線を図12に示す。

窒素雰囲気下では、約270℃（13分）から第1段階の減量が始まり、この減量が穏やかになる約380℃（16分）から第2段階の減量が続いて起こっている。双方の減量においてDTA曲線は弱い発熱を示しているが、発熱量は小さい。IRの総吸収強度をプロットしたものを図13に示す。IR吸収を持つ化合物は、約15分より発生し、18分をピークとしていったん減少する。その後、21分から再び増加し、24分をピークとして減少し、その後IR吸収を持つ化合物の生成はない。この増減は、TG曲線の第1段階減量、第2段階減量とよく一致している。この両者から、窒素中でEVAは2段階のメカニズムを経て最終的に分解することを示している。

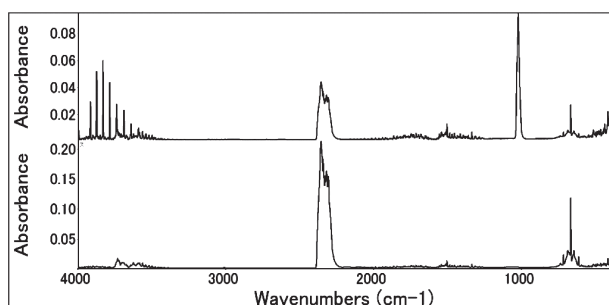



図10　約15分のピークでのIRスペクトル（上段）と約25分のピークでのIRスペクトル（下段）

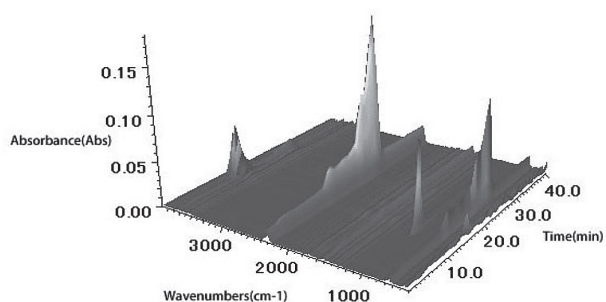



図11　測定時間に応じた各波数吸収とその強度（空気中モジュールA第6層）

図12　TG-DTA曲線（窒素中モジュールA第3層）

総吸収強度プロットの2つのピーク位置でのIRスペクトルを図14に示す。18分のピーク位置のIRスペクトルは、3500cm^{-1}付近のO-H、1800cm^{-1}付近のC=O、1180cm^{-1}のC-O等の各吸収から酢酸であり、25分のピーク位置のIRスペクトルは炭化水素のスペクトルと認められた。

総測定時間中の各波数の吸収強度を、時間、波数、強度で3次元表示したものを図15に示す。測定時間内では18分から20分にかけての酢酸の吸収と21分から25分にかけての炭化水素の吸収のみしか顕著な吸収は見られない。

これらから、窒素中でのEVAの分解挙動は、PVFと同様に温度上昇と共に置換基の脱離、直鎖の切断と既報*3)のとおり進むことが確認された。

次に、モジュールA第3層のEVAを空気雰囲気下で測定したTG-DTA曲線を図16に示す。

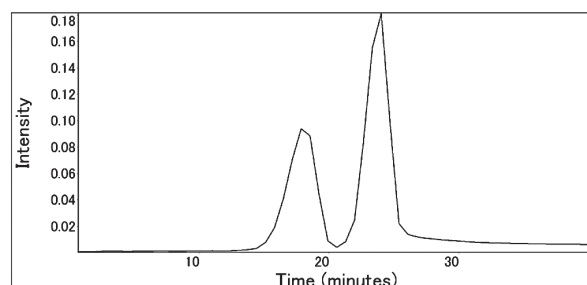



図13　総赤外吸収スペクトルの時間変化（窒素中モジュールA第3層）

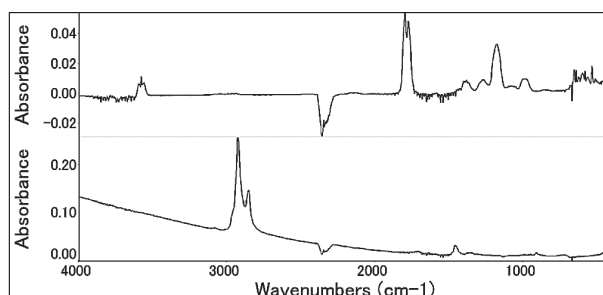



図14　約18分のピークでのIRスペクトル（上段）と約25分のピークでのIRスペクトル（下段）

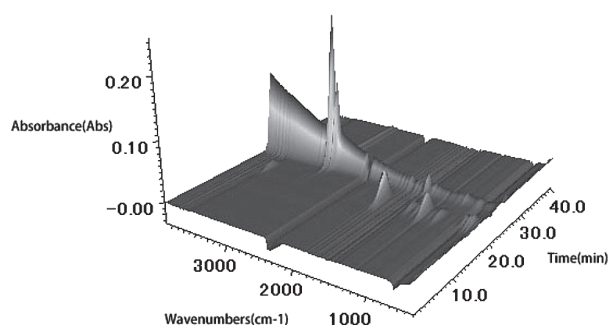



図 15　測定時間に応じた各波数吸収とその強度（窒素中モジュール A 第 3 層）

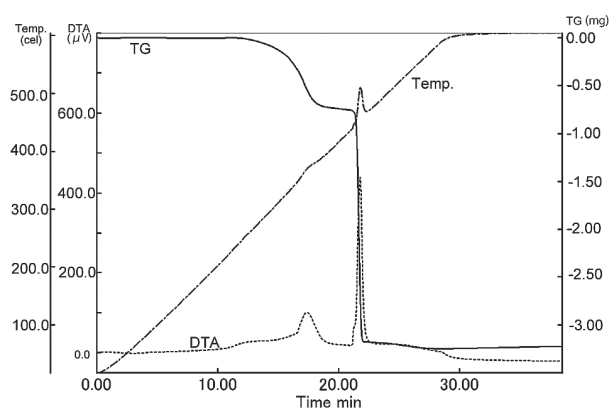



図 16　TG-DTA 曲線（空気中モジュール A 第 3 層）

約 250℃からの第1段階減量、約 430℃からの第 2 段階減量は窒素雰囲気中と同様の挙動を示している。双方の減量共に、DTA 曲線は強い発熱を示しており、2 つのは減量共に空気中の酸素による燃焼分解を起こしていると考えられる。

IR の総吸収強度のプロットを図 17 に示す。窒素雰囲気下と同様に 2 つのピークが認められ、これぞれのピークは TG 曲線の第 1 段減量、第 2 段減量に対応している。

2 つのピークでの赤外吸収スペクトルを図 18 に示す。17 分のピークは酢酸と二酸化炭素の混合したスペクトルであり、22 分のピークは炭化水素鎖にカルボニルの吸収が認められ、アルデヒドのスペクトルと考えられた。また、二酸化炭素の強い吸収も同時に認められた。

総測定時間中の各波数の吸収強度を、時間、波数、強度で 3 次元表示したものを図 19 に示す。測定時間内では 15 分から 20 分にかけての酢酸、二酸化炭素の強い吸収と 21 分から 23 分にかけてのアルデヒドと二酸化炭素の吸収のみしか顕著な吸収は見られない。即ち、加熱と同時に酢酸の脱離が起こるが、同時に酸化分解又は酢酸の酸化が生じ、脱離後の主鎖も同様に、酸化分解又は分解と同時に酸化が起こっており、アルデヒドと二酸化炭素に変化していると考

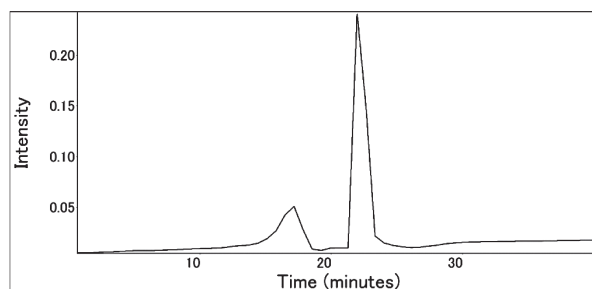



図 17　総赤外吸収スペクトルの時間変化（空気中モジュール A 第 3 層）

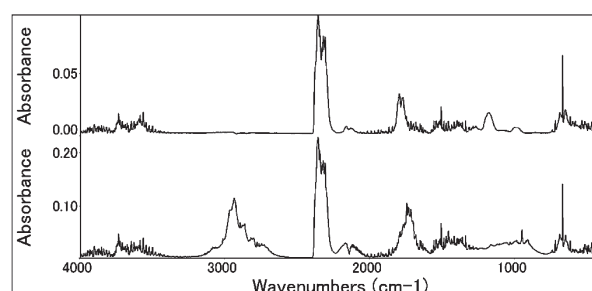



図 18　約 17 分のピークでの IR スペクトル（上段）と約 22 分のピークでの IR スペクトル（下段）

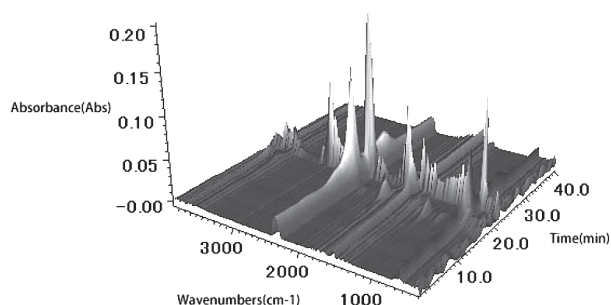



図 19　測定時間に応じた各波数吸収とその強度（空気中モジュール A 第 3 層）

えられる。

これより EVA は、火災時の火炎中においては約 300℃で酢酸の生成が予想され、酢酸脱離後は、酸化分解又は分解と同時の酸化によりアルデヒドが生じることが予想され、酢酸の脱離と同時に二酸化炭素が生成することが予想される。

4.1.3　PETの窒素及び空気中での加熱分解

モジュール B 第 4 層、第 5 層の PET について、窒素雰囲気下で測定した TG-DTA 曲線を図 20 に示す。

窒素雰囲気下では、約 300℃（15 分）から減量が始まり、約 500℃（25 分）まで1段階の減量が起こっている。DTA 曲線は減量時に弱い発熱を示している。

TG-DTA曲線と同時に測定しているIRの総吸収強度をプロットしたものを図21に示す。IR吸収を持つ化合物は、約20分より発生し、23分をピークとして減少し、約35分程度まで弱く出続ける。この増減は、TG曲線の減量とよく一致している。この両者から、窒素中でPETは1段階のメカニズムを経て最終的に分解することを示している。

総吸収強度プロットのピーク位置でのIRスペクトルを図22に示す。ピーク位置のIRスペクトルは、カルボニル化合物のスペクトルであるが、同定までは至らなかった。

総測定時間中の各波数の吸収強度を、時間、波数、強度で3次元表示したものを図23に示す。

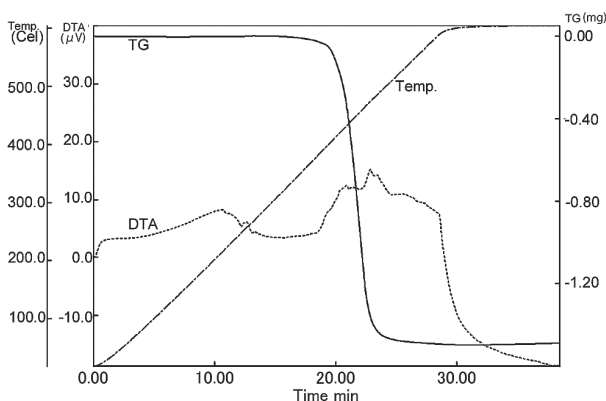



図20　TG-DTA曲線(窒素中モジュールB第4層、第5層)

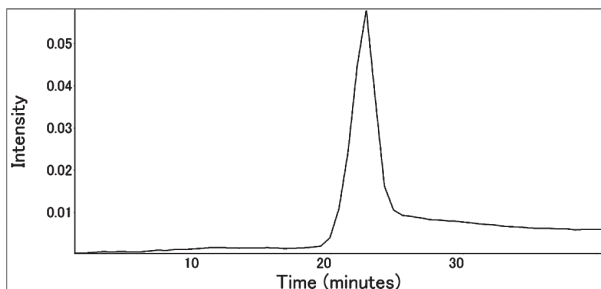



図21　総赤外吸収スペクトルの時間変化（窒素中モジュールB第4層、第5層）

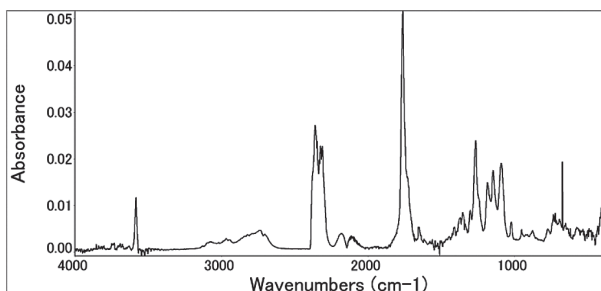



図22　約23分のピークでのIRスペクトル

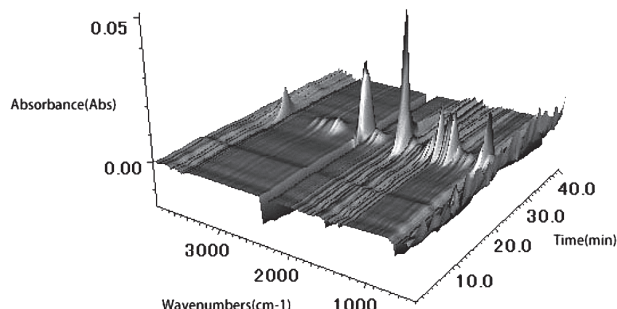



図23　測定時間に応じた各波数吸収とその強度（窒素中モジュールB第4層、第5層）

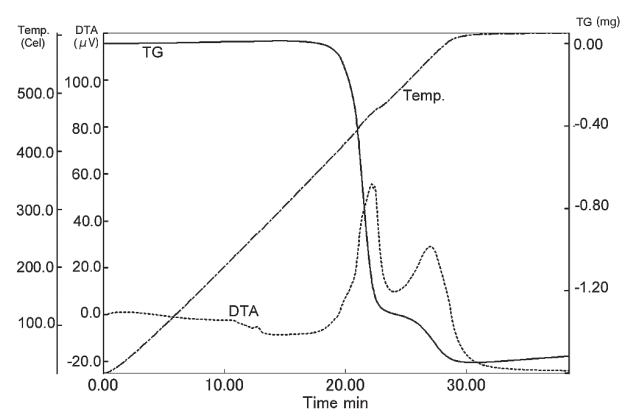



図24　TG-DTA曲線(空気中モジュールB第4層、第5層)

これらから、窒素中でのPETの分解挙動は、PVFやEVAとは異なり、温度上昇と共に主鎖の切断が進行することが確認された。

次に、モジュールB第4層、第5層のPETを空気雰囲気下で測定したTG-DTA曲線を図24に示す。

分解開始温度は窒素中とほぼ同じ約300℃から開始しているが、約480℃からの第2段階減量が生じている。DTA曲線は、双方の減量共に強い発熱を示しており、空気中の酸素による燃焼分解を起こしていると考えられる。

IRの総吸収強度のプロットを図25に示す。窒素雰囲気下と異なり2つのピークが認められ、これぞれのピークはTG曲線の第1段減量、第2段減量に対応している。2つのピークでの赤外吸収スペクトルを図26に示す。22分のピークは窒素中での分解生成物に二酸化炭素がより強く混合したスペクトルであり、28分のピークはほとんど二酸化炭素のスペクトルである。

総測定時間中の各波数の吸収強度を、時間、波数、強度で3次元表示したものを図27に示す。測定時間内では19分から25分にかけては、二酸化炭素以外の含酸素化合物の生成が認められるが、それ以降は二酸化炭素のみが生

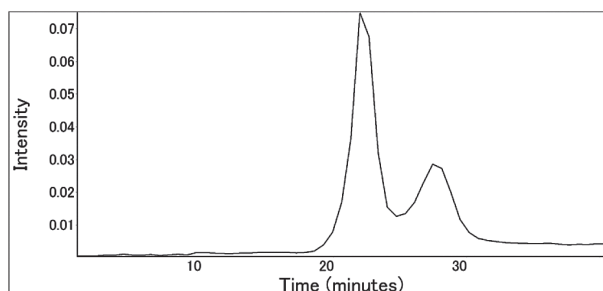



図 25　総赤外吸収スペクトルの時間変化（空気中モジュール B 第 4 層、第 5 層）

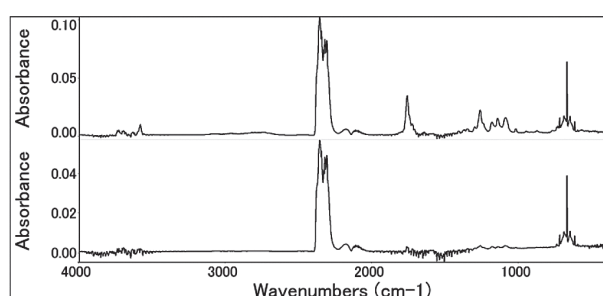



図 26　約 22 分のピークでの IR スペクトル（上段）と約 28 分のピークでの IR スペクトル（下段）

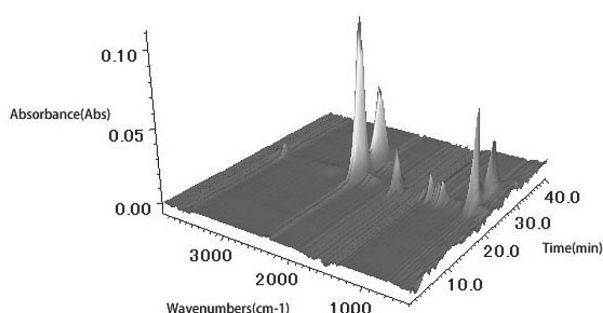



図 27　測定時間に応じた各波数吸収とその強度（空気中モジュール B 第 4 層、第 5 層）

成していることから、加熱と同時に PET 鎖のテレフタル酸部分の分解が生じ、同時に PET 鎖の酸化分解又は生成分解物の酸化が生じていると考えられる。

これより PET は、火災時の火炎中においては約 350℃から何らかのカルボニル化合物の生成が予想され、その後二酸化炭素が生成することが予想される。

測定した 3 つの高分子化合物の全てにおいて、窒素中では高分子鎖の加熱のみによる分解挙動が、空気中では空気中に含有する酸素が関与した分解が認められ、それぞれに対応した分解生成物が確認された。

4.2　MSによるモジュール燃焼生成ガスの測定結果

4.2.1　モジュールAの燃焼結果

ブンゼンバーナーでモジュールを加熱したところ、セル温度は最高 450℃まで上昇した。表面温度が約 270℃から分解生成物の検出が顕著になった。

検出された質量数は、16、26、42、54、58、78、92、104 であり、EVA の空気中 TG 測定により検出された酢酸の分子量に相当する質量数 60 は検出されなかった。その反面、空気中の TG 測定により検出されなかった芳香族化合物と思われる質量数 78（ベンゼン）、92（トルエン）、104（スチレン）が検出された。PVF は、置換基のフッ素が隣接水素とともに脱離すると、図7に示したような共役二重結合を有する直鎖が生成するため、この主鎖の分解から六員環を生成し安定化し、その置換体が生じたものと考えられる。

ガスが発生を開始してから約 5 分後には、接炎部分の燃焼がほぼ終了し、バーナー火炎が第 1 層のガラス面裏面に達しており、第 2 層から第 6 層までが燃焼、あるいは融解しているのが観察された。

窒素中、及び空気中の TG 測定により検出された HF は、MS 装置の機構上、検出はできなかった。

4.2.2　モジュールBの燃焼結果

モジュール B では、表面温度が約 100℃程度からガスの生成が開始した。

検出された質量数は、16、26、42、54、58、78 であり、EVA の空気中 TG 測定により検出された酢酸の分子量に相当する質量数 60 は、モジュール A 同様に検出されなかった。検出された化合物は、PET の構造を考慮すると、熱分解生成物として生成可能性のあるものと考えられた。加熱開始から 2 分 30 秒後には接炎部分の燃焼がほぼ終了し、バーナー火炎が第1層ガラス面裏面に達しており、第 2 層から第 5 層までが燃焼したのが観察された。

4.3　加熱分解と炎の燃焼による分解の比較

4.1 及び 4.2 の実験で検出された生成ガスの一覧を表5に示す。

モジュール構成の部材を単体で加熱分解した際の生成ガスと、モジュール全体を炎により燃焼させた際の生成ガスに違いがみられた。TG による加熱分解は、窒素中では高分子化合物の構造に由来するものがほとんどであるが、空気中では酸化物や二酸化炭素がほとんどである。　空気中での酸化物についても、窒素中での分解生成物がその後に酸化されていると考えられるものが多い。

これに対して、炎を用いてモジュールを燃焼させた際に生じる生成ガスは、空気中の酸素により酸化されたと考えられるアルデヒドのような酸化物、また加熱分解により生成し酸化されずに検出されたアセチレン等の不飽和炭化水素、及びベンゼン等の分解後の再結合により生成したと考えられる化合物が検出している。

その中でも、モジュールA、B双方で使用されているEVAは、TGにおいては窒素中、空気中いずれからも分解生成物である酢酸が検出しているのに対して、炎を用いてモジュール本体を燃焼させた場合、モジュールA、Bどちらのモジュールからも酢酸は検出されない。EVA主鎖からの酢酸の脱離は約300℃で生じており、主鎖の切断温度よりも低いため、火炎に曝されて段階的にEVA温度が上昇する過程では、主鎖からの分解物の生成前に切断反応が生じ、酢酸が生成しているものと思われる。しかし、脱離後の酢酸が周囲の炎に再び加熱されることにより熱分解や酸化分解を起こし、更に小さい分子となることが酢酸が検出されなかった原因ではないかと考えられる。

このように、火炎による分解挙動は、空気中の酸素や火炎から常時与えられる熱により、分解・燃焼に複雑な挙動を有しているものと考えられる。

5．まとめ

太陽光発電モジュールの構成部材が燃焼の際に生成するガスについて、単体の構成部材をTG-IR、モジュールをMSにより検査した。

構成部材単体では、温度に応じて構成部材特有の熱分解生成物が検出された。この生成物は、雰囲気により異なり、特に空気雰囲気下では酸化物の生成が認められ、構成部材の高分子化合物が酸化分解又は分解後の酸化反応を起こしていることが認められた。

モジュール燃焼の際の生成ガスは、TGによる分解挙動よりも複雑なメカニズムによるものと推定された。これは、火炎の揺らぎにより生じる構成部材の温度むらから、分解がTGの場合のように起こらないことや、分解後に更に炎に曝され高温になることから、その中での燃焼、再結合等が生じているものと考えられる。更に、バックシートにハロゲン化合物を含有する高分子化合物では、有害なハロゲン化水素等が生じる可能性がある。

また、モジュール全体で燃焼させた場合、各層間に用いられている接着剤も同時に燃焼しており、この影響も無視できない要因となっている可能性もある。今後モジュール全体の燃焼を考察する場合、この点も考慮する必要がある。

参照、参考文献

1）阿部伸之、塚目孝裕、田村裕之、松島早苗、尾川義雄、河関大祐、森井統正：火災時における太陽電池モジュールの発電特性、消防研究所報告、No.114、pp.1-8、2013

2）田村裕之、阿部伸之、松島早苗、河関大祐、塚目孝裕、高梨健一、尾川義雄：種々の火炎光の分光スペクトルと太陽電池モジュールの発電特性、消防研究所報告、No.115、pp.12-17、2013

3）木下良一、武井義之他、第29回熱測定討論会要旨集 ,32(1993)

表5　各測定での検出ガス一覧

		Without fire						With fire	
	Modules							A	B
	Materials	PVF		EVA		PET		PVF EVA	PET EVA
	Atmosphere	N_2	Air	N_2	Air	N_2	Air	Air	Air
Compounds	hydrogen fluoride	○	○	×	×	×	×	−	−
	silicon tetrafluoride	○	○	×	×	×	×	−	−
	acetic acid	×	×	○	○	×	×	×	×
	n-hydrocarbon*	○	×	○	×	×	×	×	×
	aldehyde*	×	×	×	○	×	×	○	○
	carbonyl compound**	×	×	×	×	○	○	×	×
	methane	×	×	×	×	×	×	○	○
	acetylene	×	×	×	×	×	×	○	○
	propylene	×	×	×	×	×	×	○	○
	butadiene	×	×	×	×	×	×	○	○
	propanal	×	×	×	△	×	×	○	○
	benzene	×	×	×	×	×	×	○	○
	toluene	×	×	×	×	×	×	○	×
	styrene	×	×	×	×	×	×	○	×

○：検出、×：不検出、△：可能性あり、−：測定対象外
*：n-炭化水素及びアルデヒドの鎖長は不明
**：カルボニル化合物のカルボニル基以外の詳細構造は不明

Degradation gas at the time of combustion of a photovoltaic generation module constituent material

(Abstract)

Takahiro Tsukame, Nobuyuki Abe, Hiroyuki Tamura, Sanae Matsushima,
Yoshio Ogawa, Ken-ichi Takanashi, Daisuke Kozeki, and Hiroaki Shimizu

(Accepted February 4, 2014)

Photovoltaic power systems, using solar energy as renewable energy, become now widely used on houses, mega solar power plants, and so on. We reported an electric danger of photovoltaic module when it burned and exposed to flame.

In this strudy, thermal degradation products from each component polymers of photovoltaic module were identified by infrared spectrometer combined thermogravimetry(TG-IR). And the degradation gas when modules burned with fire was examined by mass spectrometer(MS). The result of TG-IR was compared with its of MS.

From th result of measurement of TG-IR, fundamental degradation compounds which sample polymers heated under atmosphere of nitrogen or air were detected. However, in the case of burning the module by the flame, the combustion of constituent material of the module was shown different behavior from TG-IR.

技術報告

消防活動時の太陽電池モジュールの感電危険性

松島　早苗、田村　裕之、阿部　伸之、高梨　健一、塚目　孝裕、
河関　大祐、尾川　義雄、志水　裕昭

(平成26年2月13日　受理)

太陽電池モジュール火災の消防活動時における消防隊員の安全確保の観点から、感電危険性把握のため、個人装備品としての手袋、靴と破壊器具の抵抗を調べた。手袋の抵抗については、水に濡れた状態では絶縁性が悪く、感電の危険性が高くなることを定量的に評価した。

また、太陽光のもとで、モジュールを破壊して、発電状況を測定した。破壊器具を使ってモジュールを部分的に破壊しても、モジュールによっては発電の可能性があることから、消防活動時のモジュールの取り扱いには注意を要することがわかった。

1．はじめに

再生可能エネルギーの普及促進により、一般住宅の屋根にも太陽電池モジュール（以下、モジュールと記述）の設置が多数見られるようになってきた。このことは、火災が発生した場合に、屋根に取り付けられたモジュールが、建物とともに火炎にさらされる可能性が高くなったことを意味する。そのような状況の中、消防活動において留意すべき新たな危険の一つとして、消火活動中や残火処理中に、破損したモジュールへの接触や漏電による消防隊員への感電が考えられる。現実に、消防隊員が感電した事例[1,2]が報告されている。

そこで、個人装備品（手袋、靴）および破壊器具の電気抵抗（以下、抵抗と記述する）を測定するとともに、モジュールの破壊実験を行い、消防隊員の感電危険性を評価した。あわせてモジュールの破壊時に、モジュールの種類によって、発電状況が異なったことについても報告する。

2．個人装備品（手袋、靴）の抵抗

消防隊員は、活動中の安全性を高めるため、安全保護具を装着している。特に、活動中の隊員への感電を防止するには、絶縁性の高い装備品であることが望ましい。また、消防活動に使用する破壊器具についても、感電防止のためには絶縁性が高い器具がよく、これらの装備品が、どのような絶縁性能を持っているかを明らかにする必要がある。

消防活動時の感電防止策の資料とするため、活動中にモジュールに接触する可能性があるものとして、手袋、靴、破壊器具の抵抗を測定した。

2.1　手袋の抵抗測定実験

2.1.1　手袋の種類

実験対象としての手袋の選定に際しては、消防本部で実際に使用されている手袋を調査し選択した。表1に示すように、測定した手袋は全部で11種類である。主に牛皮革で作られた手袋①、②、③、④、皮革とケブラー繊維で作られた手袋⑤、⑥、⑧、⑨、⑩、甲と掌にケブラー繊維を使った手袋⑦、この他に防水性のある一般の手袋⑪についても抵抗の測定を行った。

2.1.2　測定方法

人体への感電では、電流が手袋の内部を流れて人体に影響を与えることから、手袋の体積抵抗率を調べることとした。体積抵抗率は、単位体積当たりの抵抗値で、物質に固有の物理量であり、多くの材料の導電性の絶対的な尺度として用いられている。

体積抵抗の測定には、抵抗測定装置（株式会社アドバンテスト、R8340Aデジタル超高抵抗・微少電流計）を使用した。本来ならば、製品としての手袋の抵抗値を測定することが望ましいが、本装置では製品の状態で体積抵抗を測定することはできない。実際の消防活動においては、手袋の掌でモジュールに接することが多いと考えられ、また破壊器具の使用時も、手袋の掌と破壊器具が接触すると考えられる。このことから、手袋の掌の部分を中心に、ハサミを使用して、直径約100mmの円形の試料を切り出し、図1のようにアルミシートで作成した測定用電極を用いて測定した。2重円環の電極は、外側のガード電極と内側の主電極を使用すると表面抵抗が測定でき、主電極と試料を挟んだ対向

表１　手袋の種類

	会社名	品名	材質	手袋厚さ寸法(mm)	外観
手袋①	(株)シモン	セイバーNo.10	牛革	1.30	
手袋②	(株)トンボ	C-33W	牛革(撥水加工)	1.41	
手袋③	日本グローブサービス(株)	No.150 WinDAM Pro-Function	牛革	1.27	
手袋④	日本グローブサービス(株)	No.155 WinDAM Pro-Function	牛革(撥水加工)	1.85	
手袋⑤	(株)トンボ	K-501	ケプラー®繊維 人工皮革	1.84	
手袋⑥	日本グローブサービス(株)	No.190	ケプラー®繊維 牛革	2.35	
手袋⑦	(株)ダイコープロダクト	DK-700-OR	甲 ケブラー®繊維 　ノーメックス® 掌 ケブラー®繊維、綿	1.70	
手袋⑧	小林防火服(株)	KC-60	ケプラー®繊維 セラミック配合牛革	1.98	
手袋⑨	TONBO	K-152BK	ケブラー®繊維 人工皮革 防寒・防水タイプ（透湿、防水フィルム）	2.77	
手袋⑩	(株)トンボ	K-144	ケブラー®繊維 牛革(撥水加工)	1.70	
手袋⑪	(株)ベルモント	シームレス防水グローブ	外側/ナイロン92% 　スパンデックス8% 内側/クールマックス®92% 　スパンデックス8%	2.05	

電極を使用すると、体積抵抗が測定できる。

各試料の厚さは、マイクロメータを使用して 5 か所を計測した値の平均とした。測定結果を表 1 に示す。測定に使用した手袋は、すべて未使用品である。この試料を使用して、乾燥状態と水に濡れた状態の体積抵抗を測定した。測定時に試料を電極で挟む荷重は 2kg とした。抵抗の測定を

行うと、測定開始からの時間により測定値が変化するため、測定開始から3分後の比較的安定した値を手袋の抵抗値とした。試料に加える電圧（印加電圧）は、実際の屋根に設置されるモジュールの総発生電圧の最大値をおよそ300Vと推定し、すべて300Vとした。測定室内の温度は18～25℃、湿度は33～44%であった。

抵抗測定装置により、体積抵抗 Rv（Ω）を計測した後、体積抵抗率 ρ_v（Ω・cm）を式(1)で求めた。

$$\text{体積抵抗率}\ \rho_v = S \times \frac{\text{体積抵抗}Rv}{\text{試料の厚さ}t} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

S：直径5cmの主電極の面積19.63（cm^2）

2.1.3　測定結果

(a)　乾燥した手袋の場合

乾いた手袋の体積抵抗と体積抵抗率の結果をそれぞれ図2、図3に示す。乾いた手袋の体積抵抗値は概ね 10^8 ～ 10^{14} Ωである。この抵抗値を使って算出した手袋の体積抵抗率は、概ね 10^{10} ～ 10^{16} Ω・cmの間であった。牛皮革だけを使った手袋の体積抵抗率は、10^{12} Ω・cmより低く、ケブラー繊維と組み合わせた手袋は 10^{15} Ω・cmより大きい値であった。皮革の手袋よりも、ケブラー繊維を組み合わせた手袋の方が、10,000倍以上大きい体積抵抗率を示した。手袋の体積抵抗率は、石英ガラスの 10^{18} ～ 10^{19} Ω・cmほど大きくはないが、乾燥木材 10^{10} ～ 10^{13} Ω・cmと同程度の抵抗率をもっており、新品の手袋ではかなり絶縁性が高いことが分かった。

(b)　水に濡れた手袋の場合

消防活動時では、消火のために水を使用することから、手袋が水で湿ることがある。そこで、手袋が水に濡れた状態では、どのように抵抗に変化があるかを調べた。手袋の場合、撥水性があるなど手袋によって効果が変わると思われるため、試料を水でぬらす方法として、試料をぬらし指でたたいて一様に湿潤した。試料がどれくらい水を含んだかは、水をしみ込ませる前後の重量変化で表した。

図1　試料の抵抗測定用電極

図2　乾いた新品手袋の体積抵抗
（横軸の丸数字は表1に対応）

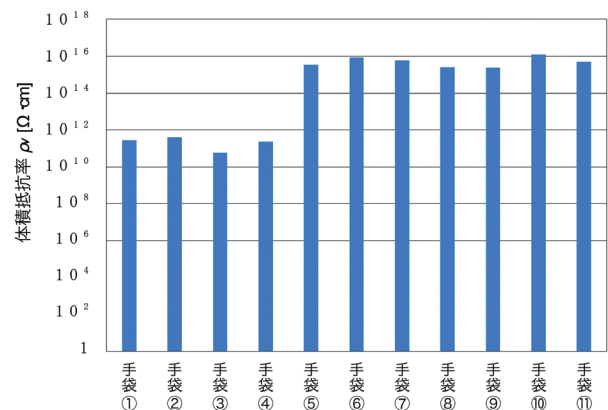



図3　乾いた新品手袋の体積抵抗率
（横軸の丸数字は表1に対応）

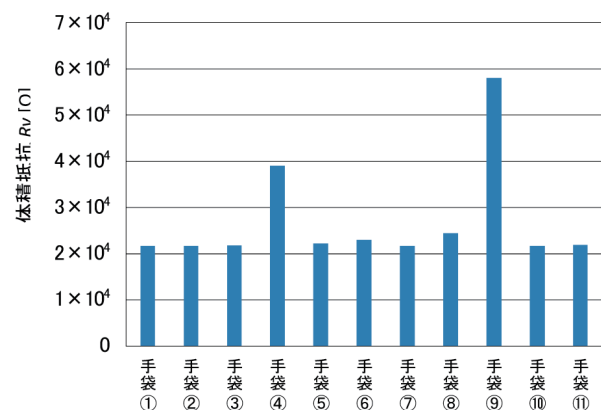



図4　水に濡れた手袋の体積抵抗
（横軸の丸数字は表1に対応）

なお、水に濡れた試料の抵抗値の測定の際も、乾燥手袋と同様に印加電圧を 300V とした。その結果を図 4 に示す。

手袋にしみ込んだ水の影響を調べるため、丈夫で吸収性のあるふき取り紙（株式会社クレシア、ケイドライ® ワイパー 132-S）を四つ折りにして、中央に水を含ませて同様に抵抗の測定を行った結果、約 22k Ωであった。水に濡れた手袋の抵抗値は 21 ～ 60k Ωで、ふき取り紙を利用して測定した値と同程度の値であり、乾いた手袋の抵抗値図 2 と比べると極めて小さい値となった。水に濡れた手袋の含水量を図 5 に示す。試料の厚みが大きいと含水量は多くなる傾向がみられた。この結果から手袋は水を含むと抵抗値が小さくなり、その値は含まれる水の抵抗値によると考えられる。図 4の④、⑨は抵抗値が大きいが、④は試料の厚さ、⑨は防水仕様で水が通りにくい部分が影響しているのではないかと考えられる。

2.2　靴の抵抗測定実験

2.2.1　靴の種類

消防隊員が使用する作業靴として、表 2 に示すようにゴム製の長靴 6 種類と編み上げ作業靴 4 種類の計 10 種類について抵抗を測定した。JIS T8101 の規格をもつ安全靴、JIS T8103 の静電気帯電防止タイプの静電靴が主である。

2.2.2　測定方法

消火活動中に、人体が電気の流れているものに接触したとしても、電気が人体を流れる通り道がなければ感電はしない。そこで人体から電気が流れるときの通り道となる靴底の抵抗を測定した。測定方法は図 6 に示すように、重量計（ザルトリウス株式会社、LA34001S）の上に靴を置き、靴の中敷きの上に幅 50mm のアルミ製のテープをのせた状態で、片足を入れてテープを踏んだ。その状態で靴の下に敷いた電極板とアルミテープ間の抵抗を測定した。テープを踏み込む時の荷重は約 20kg で、重量計の表示が約 20kg となるようにして、靴底の抵抗を 1 回測定した。印加電圧は、300V である。測定は、抵抗測定装置で行った。

2.2.3　測定結果

図 7 に示すように、測定した靴の抵抗は、1×10^6 ～ 1×10^{12} Ωの値であった。その中の静電気帯電防止型の長靴②、編み上げ作業靴⑦と⑧の抵抗値は、およそ 10^6 Ωオーダーであり他の靴よりも小さかった。

2.3　破壊器具の抵抗測定実験

2.3.1　破壊器具の種類

消防活動の際に、窓ガラスや家屋を壊すために使用される破壊器具として、ここでは人の手で扱う万能斧、とび口の 2 種類を測定した。測定した破壊器具を表 3 に示す。

2.3.2　測定方法

破壊器具のグリップや柄にアルミテープを巻きつけて、抵

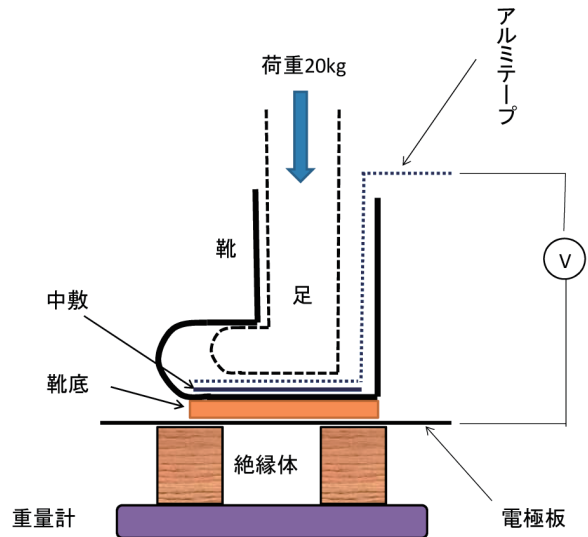



図 6　靴底の抵抗測定用電極

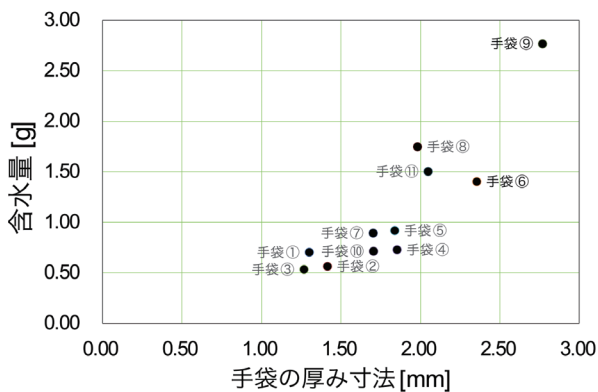



図 5　水に濡れた手袋の含水量
（丸数字は表 1 に対応）

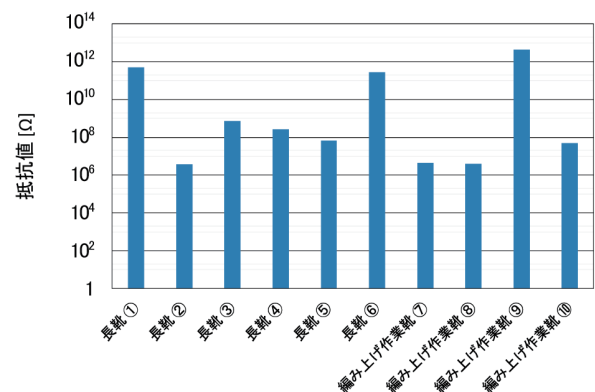



図 7　靴の抵抗値

表2　靴の種類

	長靴 ①	長靴 ②	長靴 ③
会社名	シバタ工業(株)	ミドリ安全(株)	インテルメイクトーヨー(株)
品名	−	SK742S	TX-760T
JIS規格	安全靴　JIS T8101	静電気帯電防止靴　T8103	記載なし
外観			

	長靴 ④	長靴 ⑤	長靴 ⑥
会社名	第一ゴム(株)	(株)シモン	シバタ工業(株)
品名	SDM-09F	−	−
JIS規格	静電靴 JIS T8101	安全靴 JIS T8101	安全靴 JIS T8101
外観			

	編み上げ作業靴 ⑦	編み上げ作業靴 ⑧	編み上げ作業靴 ⑨	編み上げ作業靴 ⑩
会社名	ミドリ安全(株)	ミドリ安全(株)	(株)アサヒコーポレーション	(株)シモン
品名	RT731F (消防静電P-4)	KS137FS (静電)	F54	SS22HiFR
JIS規格	静電気帯電防止 JIS T8103	静電気帯電防止　JIS T8103	記載なし	静電気帯電防止　T8103
外観				

表３　測定に使用した破壊器具

	会社名	品名（柄の材質）	長さ寸法 [mm]	重量 [kg]	外観
万能斧 ①	オカニワ(株)	トップマンとび（絶縁ゴム）	330	0.95	
万能斧 ②	土牛産業(株)	DPX-RX	440	1.23	
万能斧 ③	PARATECH Emergency Equipment Manufacturers	PRY AXE	470	2.89	
万能斧 ④	土牛産業(株)	DPX-2311（絶縁ゴム）	470	2.80	
とび口 ①	(株)モリタ	（グラスファイバー）	1890	1.99	164cm
とび口 ②	東京サイレン(株)	（木）	1100	2.30	77cm

※抵抗測定箇所は、写真に示した２つの矢印の間

抗の測定を行った。抵抗の測定位置は、万能斧①～④は尖端とグリップの間、とび口①は尖端と尖端から164cmの間、とび口②は尖端と尖端から77cmの間であり、表３に矢印で示す。塗装された尖端は複数回使用したことを想定して、やすりで塗装を部分的に除去した。柄の測定箇所も、やすり掛けを行った。測定装置としては、抵抗値に応じてデジタルマルチテスター（Agilent社、U1252A）および抵抗測定装置を使用した。抵抗測定装置を使用した時の印加電圧は300Vである。測定回数はそれぞれ１回である。

2.3.3　測定結果

(a)　乾燥した破壊器具の場合

破壊器具の抵抗の測定結果を図８に示す。万能斧のグリップ部分の抵抗値は、概ね1×10^4～1×10^{13}Ωまで幅広い値を示した。万能斧①の抵抗値は、約5kΩと他の万能斧と比べて、小さかった。とび口の抵抗値は、1×10^9Ω以上あり、絶縁性は良いと言える。万能斧の金属部分の抵抗は、ほぼ０であった。

(b)　水に濡れた破壊器具の場合

破壊器具は、消防活動時の放水の影響により、水がかかることが考えられる。特に破壊器具の柄が木製の場合は、水によって絶縁性が悪くなることが考えられる。

そこで、水がしみ込みやすくするため、柄が木製であるとび口②の表面の塗料をサンドペーパーでこすり落とし、２日

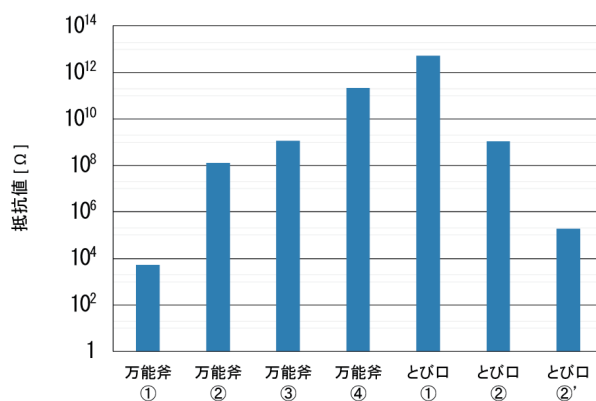
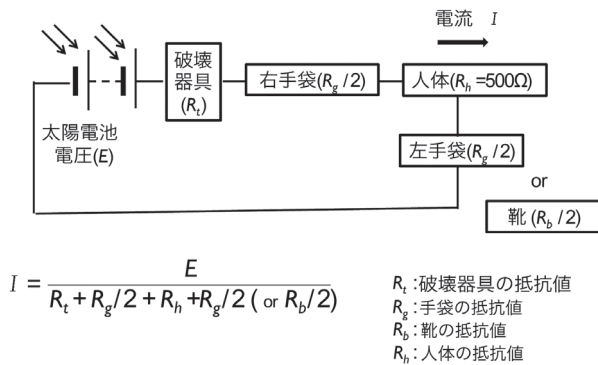



図８　破壊器具の抵抗値
（とび口②'はとび口②の柄を水でぬらしたもの）

$$I = \frac{E}{R_t + R_g/2 + R_h + R_g/2\ (\text{or}\ R_b/2)}$$

図 9　人体の感電モデル

表 4　単結晶シリコンモジュールと CIS モジュールとの仕様[5, 6]

型式	NU-122CB	SF160-S
会社名	シャープ㈱	ソーラーフロンティア㈱
セルの種類	単結晶シリコン	CIS
最大出力 (W)	122	160
最大出力動作電圧 (V)	14.96	84
最大出力動作電流 (A)	8.16	1.91
開放電圧 (V)	18.77	110
外形寸法（幅 mm × 奥行 mm ×高さ mm）	990 × 856 × 46	1257 x977 x 35
質量 (kg)	11	20

間水に浸した。その後、素材が樫と推定して木材水分計（株式会社ケット科学研究所、MT-900）で水分を測定した結果、約 32% であった。とび口尖端と柄の間の抵抗の測定結果を図 8（とび口② '）に示す。水に浸した時の抵抗値は、乾燥時と比べておよそ 1000 分の 1 の 190k Ωまで低下した。乾燥している状態では、高い絶縁性を有する木製のとび口であっても、水の影響で抵抗値が低くなることが分かった。

2.4　感電危険性の評価

人体の感電のモデルを図 9 に示す。ここで、破壊器具の抵抗値が無視できるほど小さいものとし、モジュールから受ける電圧を 300V とする。濡れた手袋を通じて、電気が片方の手から人体に入り、もう片方の手から出ると想定する。

水に濡れた手袋の円形試料（主電極との接触面積は 19.63cm^2）の抵抗値を 20k Ω、物を掴んだ時の手袋の掌の接触面積を約 40cm^2 とする[3]と掴んだ時の抵抗値は 10 k Ωとなる。両手では直列となり 20k Ω、更に人体の抵抗 500 Ωが加わって合計 20.5k Ωとなる。人体を流れる電流は 14.6mA と計算でき、可随電流（または離脱電流）は、直流で 20mA[4]といわれているが安全とは断定しにくい。

万能斧①の抵抗値 5k Ωを考慮し、万能斧を通じて、斧を掴んでいる手袋、人体と電気が流れ、もう片方に電気が逃げていくとすると、抵抗は合計で、25.5k Ωとなり電流値は 11.8mA となった。

片手から電気が入り人体を通して両足に抜けたと仮定する。抵抗値 4M Ωの靴（片方）を通して電気が流れる場合、300V の電圧が両方の靴底にかかるため、両方では靴の抵抗値は 2M Ωとなる。人体の 500 Ωと片手の抵抗 10k Ωは 2M Ωに比べて無視できるほど小さい。この抵抗値では、流れる電流値は 0.15mA としびれを感じ始める電流値 2mA[4]以下であり安全側である。

3．モジュール破壊時の発電確認実験

消防活動では、消防隊員が複数枚のモジュールが設置された建物の屋根に上り、モジュールを屋根から撤去する作業やモジュールを破壊する作業を考慮しておかなければならない。特に、太陽光の下では、モジュールが常に発電状態にあることから、モジュールの除去や破壊作業では、消防隊員に感電の危険が及ぶことが考えられる。そのため、モジュールの種類によってどのような発電特性があるかを検討する必要がある。そこで、モジュール1枚を実験的に破壊し、モジュールによる電圧変化を測定した。

3.1　モジュールの種類

住宅用やメガソーラー発電用のモジュールとしては、単結晶シリコン、多結晶シリコン、CIS（銅、インジウム、セレン）が一般的に使用されている。実験にはこれらのモジュールを使用した。単結晶シリコンと多結晶シリコンでは太陽電池そのものは異なるが、モジュール内部の電気回路構成は同じである。破壊器具による実験では、単結晶シリコン及び CIS の 2 種類のモジュールを使用した。使用した単結晶シリコンモジュールは、シャープ株式会社製の NU-122CB モジュールである。CIS モジュールは、ソーラーフロンティア株式会社製の SF-160S モジュールである。仕様は、表 4 のようになっている。

3.2　実験装置

モジュールを固定するため縦 100mm ×横 50mm ×厚さ 2mm の鋼製の軽溝形鋼を用いて、4 本脚の固定台を製作した。固定台の大きさは、縦 1100mm、横 1185mm、高さ 400mm である。破壊の衝撃によって、モジュールが固定台からずれないように、モジュールの四隅と固定台を小型のシャコ万力を使って固定した。さらに、破壊の衝撃による固定台の揺れを少なくするように、固定台に 10kg の砂袋を 2 か所取り付けた。

破壊するモジュールと破壊しないモジュールの出力電圧を比較するため、図 10 のように破壊するモジュールの隣にブロックを置いて、破壊しない別の同型モジュールをブロック上に設置した。モジュールの出力電圧変化を測定するために、モジュールの出力端子に負荷抵抗に見立てた抵抗器を取り付けた。単結晶シリコンモジュールは 2 Ω、CIS モジュール

図 10　単結晶シリコンモジュールの実験装置

図 11　万能斧①による破壊後の単結晶シリコンモジュール

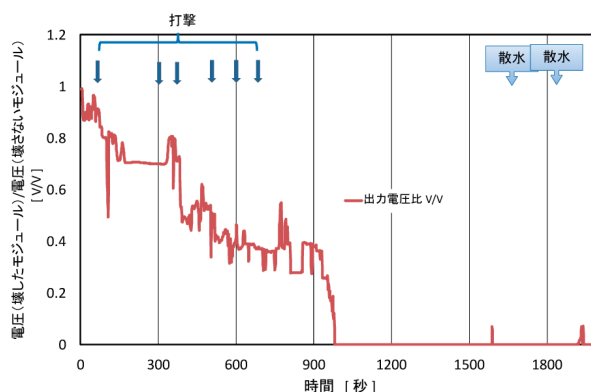



図 12　単結晶シリコンモジュール破壊時の出力電圧比

には 50 Ωをそれぞれ取り付け、抵抗器の両端子をデータロガーに接続した。照度の経時変化は、照度計（コニカミノルタセンシング株式会社、T-10W$_L$A）で測定した。

3.3　単結晶シリコンモジュール

3.3.1　破壊方法

破壊実験について、消防研究センターの本館屋上で、2013 年 8 月 21 日に行った。天候は晴れ気温は、37℃、湿度は 47% である。

破壊器具としては、表 3 の万能斧①を使用した。これを使って、現役の消防隊員の手によって、モジュールの表面のガラス面から裏面まで、尖端部が貫通するようにして破壊した。

1 回目の打撃に引き続き、発電しなくなるまで万能斧①の尖端部、斧部により同じモジュールを使用し、打撃を繰り返し行った。破壊場所は図 11 のように計 6 回か所である。このモジュールは、3 つのクラスタ[7] から構成されていた。1つのクラスタにつき 2 か所貫通破壊するように打ち付けた。その後、水による影響を調べるために、モジュール破壊部分にバケツで水道水を流した。これらによりモジュール破壊時、及び散水時のモジュール発電状況を調べた。

3.3.2　破壊時のモジュール出力電圧

モジュールの出力電圧は、日照により変化する。破壊実験時の影の影響をなくした発電状況を見るため、縦軸に壊したモジュールと壊さないモジュールの電圧比をとって、破壊時の電圧比を時系列に示したものが図 12 である。

モジュールをセル間の配列を切るように破壊していくと、出力電圧が減少していった。3 回の破壊で約 2/3、6 回の破壊で約 1/3、その後に斧部で損傷部を 3 か所拡大したところ出力電圧は 0V となった。破壊した時刻と出力電圧比の変動時刻は一致してはいない。しかし、モジュールは3つのクラスタの構造を持っているので、出力電圧値が約 1/3 ずつ減少している理由は、モジュールの構造に関係があり、クラスタごとに出力が出せなくなっている。破壊後に、モジュールに 2 回散水を行った。散水時と発電時期はずれており、散水の影響は確認できなかった。

3.4　CISモジュール

3.4.1　破壊実験

実施日は、単結晶シリコンモジュールと同じ 2013 年 8 月 21 日である。単結晶シリコンモジュールと同じように、CIS モジュールの表面から裏面まで、万能斧①の尖端部が貫通するように打ち付けた。

破壊器具の尖端部がモジュールに貫通したところを表面から観察すると、図 13 のように、万能斧①が貫通した部分から直径約 20cm の広がりでクモの巣状に表面ガラスにヒビが入った。それ以外のガラス面でも、モジュールの表面が強化ガラスで覆われているため、ガラスに細かなヒビが入った状態となった。

モジュールの裏面からも観察すると、破壊器具の尖端が裏面から突き出ていた。

3.4.2　破壊時のモジュール出力電圧

実験時の太陽光の照度は、70,000 ～ 130,000 lx で、CIS モジュール1枚の出力電圧は最大で約 82V だった。

図13　万能斧①の尖端が貫通したCISモジュール

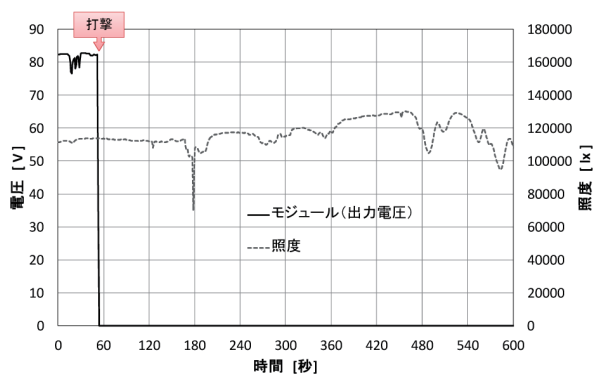



図14　万能斧①によるCISモジュール破壊時の電圧

CISモジュールを破壊した時の出力電圧は、破壊した瞬間から図14に示すように0Vとなった。実験で使用したCISモジュールは、破壊器具の一撃で、尖端部が表面から裏面まで貫通すると、直ちに発電が停止することが確認された。CISモジュールに比べて、単結晶シリコンモジュールの出力を抑えるには、徹底した破壊が必要である。

4．複数の単結晶モジュール接続時の破壊実験と出力電圧

消防活動中、直列に接続された複数のモジュールのうち1つを破壊器具で破壊し、消防隊員がその破壊器具の金属部分に触れた場合を想定して、高電圧がかかった状態での破壊実験を行った。また、破壊器具の種類を変えてモジュールの破壊実験を行い、破壊状況の観察、出力電圧の測定を行った。

4.1　実験方法

消防研究センターの本館屋上で、2013年8月20日に単結晶シリコンモジュールの破壊実験を行った。天気は晴れ、気温35.5℃、湿度45%であった。

一般住宅の屋根に設置した時と同程度の電圧を発生させた状態で破壊実験を行うため、図15のように単結晶シリコンモジュール14枚を2列に並べ、破壊するモジュールをその端に設置し、合計15枚のモジュールを直列に接続した。

破壊時にモジュールが動かないように、いままでの破壊実験と同様、固定台に固定した。破壊器具として、3種類の万能斧①、万能斧③、とび口①を使用した。1種類の破壊器具について、1枚のモジュールを破壊する実験を行った。

4.2　出力電圧の測定方法

破壊器具の尖端部に導線を取り付け、これを人体の抵抗値に見立てた抵抗器500Ωに接続し、この抵抗器の端子電圧を間接的に測定した。電圧測定回路図を図16に示す。15枚のモジュールを直列に結線した場合、1枚につき開放電圧値は18V以上あるので、15枚全部を直列に接続すると約270Vの直流電圧値となる。データロガーが取り扱える最大電圧値が100Vであったため、データロガーへの入力のために、電圧を下げる必要があった。そこで、抵抗器470kΩと抵抗器33kΩを直列接続した計測用合成抵抗器を抵抗器500Ωに並列接続し、抵抗器33kΩの端子電圧を測定することにより、抵抗器500Ωの端子電圧を算出した。計測用合成抵抗器を並列に接続しても抵抗器500

図15　破壊する単結晶シリコンモジュールを含めモジュール15枚を並べた実験装置

$$V_{R500}=(470+33)/33\times V_{R33k}$$
$$\fallingdotseq 15.2\times V_{R33k}$$

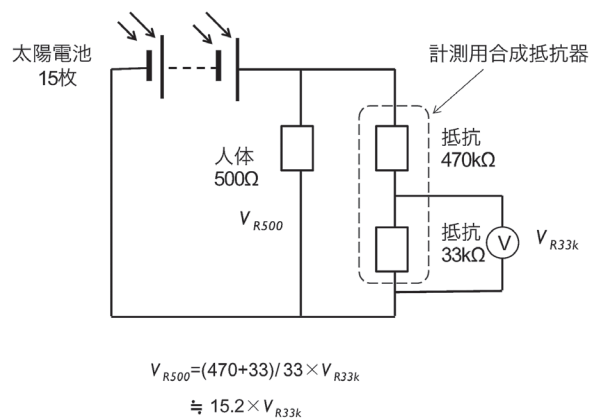



図16　単結晶シリコンモジュール破壊実験の電圧測定回路

Ωに流れる電流の変化は、0.1% 程度に抑えられるため、人体を模擬した抵抗を流れる電流への評価には影響はないと判断した。

4.3　破壊器具によるモジュールの破損状況

万能斧③を使って、モジュールの表面ガラスから裏面に破壊器具の尖端部が貫通するように、成人男性の力でモジュールを打撃した。感触では、容易にモジュールを貫通することができたとのことである。万能斧③により破壊したモジュールの様子を図 17 に示す。

破壊器具貫通後のモジュールの表面ガラスの状況を観察すると、尖端部が貫通したところからクモの巣状にガラスが割れ、貫通場所以外でも、ガラスにヒビが入った状態となった。

図 17 に示すように、万能斧③とモジュールとが接触している部分では放電と思われる眩光、火炎が見られ、その部分から煙の発生、刺激臭が観察された。これは、モジュールに使用されている樹脂が熱分解して酢酸が生じたことによると考えられる。ガラスの破砕状況、接触部分については、破壊器具の種類による違いは見られなかった。

図 17　万能斧③による単結晶シリコンモジュールの破壊。矢印の先に眩光が見える。

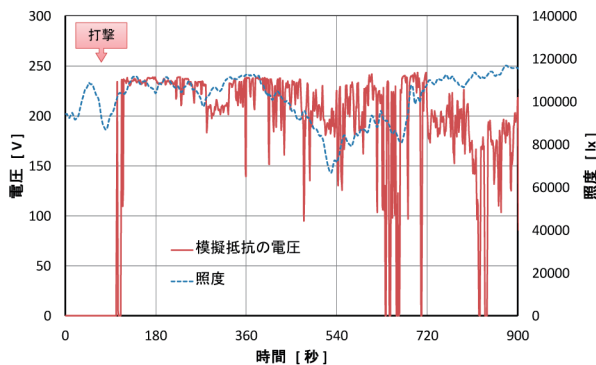



図 18　万能斧③により複数連結した単結晶シリコンモジュールを破壊した時の人体を模擬した抵抗にかかる電圧の経時変化

4.4　破壊時の出力電圧

万能斧③を打ち付けた時の出力電圧値の変化を図 18 に示す。実験時の太陽の照度は、70,000 ～ 120,000 lx である。打撃時には、抵抗器 500 Ωの端子電圧は、0V を示していた。このことは、破壊したモジュールから万能斧には、電流は流れていないことになる。消防隊員の破壊動作中に、破壊器具がモジュール内の発電回路に接触することを想定し、万能斧をモジュールに刺した状態で、えぐるように動かしたところ、抵抗器 500 Ωの端子電圧が約 240V を示した。万能斧③をモジュールに突き刺したまま動かすと、出力電圧値は 0V と約 240V の値を行き来するように変化した。

他の破壊器具でも同様に、刺したままで破壊器具を動かすことにより、電気が流れたり、流れなかったりする状況が観測された。破壊作業中も、破壊器具に 300V 程度の高電圧の電気が流れることから、感電には注意を要する。

5. まとめ

消防活動時の消防隊員の安全確保の観点から、感電に関連して個人装備品（手袋、靴）や破壊器具の抵抗を調べた。また太陽光のもとでモジュールを破壊し、破壊時のモジュール出力特性、人体にかかる電圧の評価について考察した結果、次のようなことが分かった。

(1)　手袋の抵抗を測定した結果、新品の乾いた手袋では、体積抵抗率1×10^{10}Ω･cm以上の絶縁性がある。しかし、水がしみ込むと絶縁性が低下し、水の導電性と同じになる。手袋に水がしみ込んだ場合、モジュールを取り扱う際には、慎重に作業を行う必要がある。

(2)　万能斧のグリップ部分は、乾燥していても絶縁性が低いものもある。柄が木製のとび口では、消火時に柄が水で濡れると絶縁低下の恐れがある。

(3)　単結晶シリコンモジュールでは、モジュールの数か所を太陽電池セル間の配列を切るように破壊器具で破壊し続けると、発電が止まった。一方CISモジュールでは、破壊器具がモジュールを貫通した時点で発電が止まった。

(4)　複数の単結晶シリコンモジュールを連結して高電圧が発生する発電状況のもとで、破壊器具でシリコンモジュールを壊したところ、モジュール破壊部分と破壊器具との接触部分で、眩しい光、火炎、刺激臭、煙が観察された。破壊器具をモジュールに刺した状態で、えぐるように動かしたところ、人体を模擬した抵抗器500Ωの端子電圧が約240Vを示した。さらにモジュールに突き刺したまま動かすと、出力電圧値は0Vと約240Vの間を変化した。

(5)　複数のモジュールが連結された場合では、モジュールの一部を破壊しても、感電に十分な電気エネルギーの発生が

考えられることから、個人装備品、破壊器具が水によって絶縁性が低下している場合には、感電への十分な配慮が必要である。

謝辞

今回実験で使用した装備品の選択にあたっては、消防研究センター火災災害調査部原因調査室の調整官、上席主任調査官、主任調査官各位にご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1）小室　修：住宅用太陽光発電システムが設置された建物火災の消防活動について、第59回全国消防技術者会議資料、pp.127-131、消防庁消防研究センター、2011
2）柴田敬吾：太陽光発電システムからの出火事例について、第61回全国消防技術者会議資料、pp.155-167、消防庁消防研究センター、2013
3）高野　剛、山本　仁、原　利昭：円筒物体の握り感覚の解明、日本機械学会論文集（C編）、Vol.63、No.607、pp.311-317、（1997-3）
4）市川紀充、冨田　一：感電の基礎と過去30年間の死亡災害の統計、労働安全衛生総合研究所安全資料、JNIOSH-SD-NO.25（2009）
5）ソーラーフロンティアウェブページ：アクセス日2013.09.08、http://www.solar-frontier.com/jpn/products/commercial_modules/C009963.html
6）シャープウェブページ：アクセス日2013.09.08、http://www.sharp.co.jp/sunvista/product/module/
7）田村裕之、阿部伸之、河関大祐、松島早苗、塚目孝裕、尾川義雄、高梨健一：太陽光発電システムの火災と消防活動上の問題点、消防研究所報告、No.114、pp.19-24、2013

Electric Shock with Photovoltaic Modules on the Fire Fighting

(Abstract)

Sanae Matsushima, Hiroyuki Tamura, Nobuyuki Abe,
Ken-ichi Takanashi, Takahiro Tsukame, Daisuke Kozeki, Yoshio Ogawa, and Hiroaki Shimizu

(Accepted February 13, 2014)

Evaluation for the possibility of electric shock is important for firefighters to act on photovoltaic modules fire. We measured electric resistance of firefighter's gloves, shoes and demolition tools for the evaluation. On the basis of the resistances, we evaluated quantitatively that the wet glove had a higher risk than the dry one.

We also perform an electric generation experiment of the single-crystal silicon module and the CIS module with striking them. The CIS module stopped generation at the moment of one strike with the firefighter's demolition tool. Electric generation of the single-crystal silicon module gradually decreased as the number of strikes increased. Therefore, we conducted that the firefighters should pay more attention to electric shock as they strike and touch the modules.

解　説

火災の着火源について

鈴木　健

（平成 26 年 2 月 18 日　受理）

火災が発生するための着火源として、以下の 9 種、すなわち、1 衝撃・摩擦、2 断熱圧縮、3 高温表面、4 熱線、5 電気火花、6 静電気火花、7 裸火、8 自然発火、9 温風をあげ、災害事例を使って説明した。

1．まえがき

火災が発生するためには、気体、液体、固体などの可燃性物質が燃焼を開始することが必要となる。そのためには、多くの場合、何らかの着火源が必要である。着火とは、可燃性物質が一定の条件の下で連続的な燃焼を開始する現象である。発火とほぼ同じ意味である。着火源となるものには様々なものがある。北川[1, 2]は、着火源を以下の 8 種、すなわち、1 衝撃・摩擦、2 断熱圧縮、3 高温表面、4 熱線、5 電気火花、6 静電気火花、7 裸火、8 自然発火に分類した。ここでは、上にあげた 8 種に、9 温風を加え、9 種とし、それぞれについて、災害事例を使って説明することとした。この 9 種の着火源で、火災における着火源を全て説明できるわけではないが、これで多くを説明できる。

消防機関は、火災事例、火災原因調査の調査結果を消防関連の雑誌に掲載している。ここでは、火災原因調査をする際の参考となるように、過去の火災事例、火災原因調査の調査結果を、消防関連の雑誌等から幅広く収集し、説明に使用することにした。

2．着火源

2.1　衝撃、摩擦

固体に摩擦、衝撃、打撃を加えると、その際の機械的エネルギーの一部は熱に変換されて、熱または火花を生じる。それが、周囲の可燃性予混合気、可燃性粉じんなどを着火させることがある。石炭鉱山での災害防止のために、この問題が熱心に調べられてきた。石炭鉱山では坑内でメタンが発生し、空気と混合して可燃性混合気を形成することがある。そのため、金属が石炭や岩石を摩擦あるいは切削するときに生じる火花または摩擦熱が、可燃性混合気を着火する危険性について調べられてきた。試験装置や測定結果が駒井ら[3]、阿部ら[4]、木下ら[5]、高岡[6]によりまとめられている。関係した事例を表 1 に示す。事例 1-1 の調査のために、東京消

表 1　衝撃、摩擦が着火源となったと推定された事例

番号	年月	都道府県	概要	出典
1-1	1996.7	東京	首都高速を走行中の移動タンク貯蔵取扱所（タンクローリー）がカーブでバランスを崩し、車体左側を下にして横転し、道路面を約 60 m 横滑りしながら停止し、炎上した。タンクローリーは、ガソリン 12 キロリットル、軽油 4 キロリットル、灯油 4 キロリットルを積載していた。焼損状況としては、タンク右側胴板が火炎の熱により溶融欠損していた。タンク左側胴板の前部から後部にかけて著しい擦過痕が生じていた。タンクのガソリン収納槽の 4 カ所に亀裂が生じていた。巻き込み防止枠等と舗装面の間の衝撃火花が、流出したガソリンの蒸気を着火させた。	7
1-2	1989.3	愛知	木工作業場で火災が発生し、倉庫兼用の作業場が全焼した。作業場の丸鋸盤鋸屑が堆積する場所が出火箇所と考えられた。丸鋸盤により挽材中に、丸鋸の刃先に取り付けられている超硬チップ付近が木材との摩擦により発熱し、このチップ付近の鋸屑が着火した。これが丸鋸盤下に堆積していた鋸屑内に落下し、その後無炎燃焼を継続し出火に至った。	11 12
1-3	1991.11	東京	11 時 5 分頃に木材加工の事業所で、自動旋盤（NC 旋盤）にアメリカ産の「栓の木」を切削のためにセットし、無人の状態で作業中に、切削くずの木くずが着火し、集塵機内に堆積した木くずに延焼し火災となった。切削工具と「栓の木」との摩擦熱で木くずが発熱し、着火した。これが集塵機に移動し、集塵機内で他の木くず等に延焼し、火災になった。	13
1-4	2007.4	東京	複合用途ビル（耐火造 56/6）の 50 階のエレベータ機械室から出火し、火災階付近の階の在館者 851 名が避難した。原因は以下のようであると考えられた。エレベータのワイヤーロープを構成する 8 本のストランドの内 1 本が摩耗して破断した。エレベータの昇降の際に破断したストランドが剥離して付近の金属（ロープガード、シーブガード）に接触したことにより火花が発生した。シーブガードに堆積していた油分を含むスラッジが、火花により着火した。	14 15

防庁では、炭素鋼板とアスファルトの間で発生する火花がガソリン蒸気を着火させうるかどうかを実験により検討した[7, 8]。また、日本自動車研究所では、自動車事故を想定し、摩擦火花の温度を実験[9]と理論計算[10]により調べた。

2.2 断熱圧縮

一般に、容器に入れた気体を圧縮すると、圧縮に費やされた仕事は熱に変わる。圧縮が急速に行われると熱損失が少なくなるので、容器内の気体の温度が上昇する[16, 17]。空気の場合の断熱圧縮による温度上昇を表2に示す。特に注意すべきは、酸素ガスを断熱圧縮してしまった場合である。酸素には以下のような特徴がある[18-20]。

① 酸素は、他のものの燃焼を助ける性質（支燃性）がある。空気中では不燃性とされているものでも、酸素中では可燃性となることがある。

② 空気中での可燃性ガスの爆発範囲よりも、酸素中での可燃性ガスの爆発範囲の方が広い。

③ 空気中での発火温度よりも、酸素中での発火温度の方が低い。

表2　空気の断熱圧縮による圧力および温度の上昇

圧縮前体積／圧縮後の体積	圧縮後の圧力［atm］	圧縮後の温度［℃］
1	1.0	20
5	9.5	284
10	25.0	462
20	66.0	698

空気を理想気体と仮定する
圧縮前の圧力を 1 atm (=1.01 × 10^5 Pa)、温度を 20 ℃ (293 K)、
比熱比を 1.40 とする

表3　断熱圧縮が着火源となったと推定された事例

番号	年月	都道府県	概要	出典
2-1	1972.7	静岡	消防署の新入職員を前に救急車から取り外した人工蘇生器の取扱い方法の説明を行った際に、酸素容器のバルブを開いた瞬間に、圧力調整器の側面から火炎が噴出した。これにより、職員3名が火傷を負った。原因は、圧力調整器内部又は周辺に油脂類、金属粉体等が付着していたことによると推定された。	31
2-2	1979.8	福岡	交通事故でけがをした幼児を救急車で搬送していた。酸素ガスを与えていたところ、容器の酸素ガスが切れた。他の容器の切替えバルブを開けたところガス漏れが起きた。バルブを閉めたが火が噴き出した。救急車内には患者を含め6人が乗っていたが全員無事だった。原因は、容器バルブに金属粉が付着しており、温度上昇によって着火したと推定された。	31
2-3	1979.5	東京	交通事故に出場した救急隊が、頭部に外傷を受けた11歳の男の子に酸素吸入をしようとし、装置をセットし、ボンベのバルブを開くと、相当な異臭があり気分が悪くなるほどであった。また、この臭いは今までかいだことのないような臭いで、吐き気をもよおすような感じであった。そのため、ボンベのバルブを閉めて、代わりに人工蘇生器を使い急場をしのいだ。帰署後、再び救急隊長が吸ってみたがまだ臭いは強かった。外見検査では、全く異常は認められず、弁の作動も正常であった。そこで器具を分解したところ、ボンベのバルブシートが焼損していた。原因は、バルブシートにグリースなどのオイルが付着していたか、ホコリなどのゴミがバルブ開閉時に着火したかのいずれかと推定された。	32
2-4	1971.9	東京	救急車に積載の人工蘇生器（ミニットマンレサシテータ）の作動状況を点検するため、ケースから蘇生器を取り出し、減圧弁が ADULT（大人）と INFANT（子供）の中間にあることを確かめた後、ボンベのコックを 1/4 回転ぐらい開いた。開くと同時に減圧弁付近でシューという音と共に閃光を発して 60 cm くらいの火炎が吹き出しはじめた。そこで粉末消火器を使いながらボンベのコックを閉め、酸素の流出を断って消火した。ボンベ圧は 90 kg/cm² であった。負傷者はなかった。焼損したのは減圧装置内部とその付近だけであったので、内部からの出火であると考えられた。そこでボンベ内部の腐食、酸素充てん時のスラッジの混入、オイルの付着、器具本体の性能、器具取り扱い状況などを調査した結果、バルブを急激に開いた時局部的な断熱圧縮がおこり、減圧弁内のナイロンが酸素雰囲気中で過熱され出火したものと判断された。	32
2-5	2001.1	栃木	119番通報により、動悸、体の震えのあるお年寄りを病院に搬送した。患者は救急車に設置された容器から酸素ガスの供給を受けた。病院内に運び込む際、携帯用酸素容器に切替えたところ、炎が上がった。救急隊員1名がやけどにより重傷となった。また、患者と付添人1名も軽傷を負った。原因は、圧力調整器内のフィルターにアルミ粉、鉄粉等の異物が入り、温度上昇等によって着火したと推定された。	31
2-6	2007.6	長野	病院のドクターカーに配備されている医療用酸素供給設備の酸素容器の交換を行い、バルブを開いたところ、突然圧力計が破裂し、運転手1名が軽傷を負った。発災の約3週間前に圧力調整器1次側の圧力計が交換され、以後発災当日までは問題なく使用されていた。酸素供給設備に使用される圧力計にもかかわらず禁油処理が施されていなかったため、酸素容器の交換のためにバルブを開いた際、圧力計内の油脂類が着火し、破裂につながったと推定された。	31
2-7	2003.8	n	救急車が出動し、3名の救急隊員の内の1名が酸素吸入を行うため、酸素蘇生器の準備作業をしていた。酸素容器のバルブを開けた瞬間、圧力調整器から着火し、酸素容器が 4 m ほど飛翔した。隊員1名が重傷、1名が軽傷を負った。原因は不明とされたが、圧力調整器の定期的なメンテナンスは行われていなかった。	33 34

n: 記載無し

④　高濃度の酸素中では、金属粉、ほこり、石油類、グリース、油脂、皮脂等は容易に発火する可能性がある。

酸素容器の圧力調整器の内部に油脂があったり、接続口のパッキンに可燃物を使用しているとき(例えば、ビニールテープなどをパッキンの代用品としている場合)、酸素容器の元弁を急激に開けると、圧力調整器内にあった酸素が、容器内から流れてきた高圧の酸素により急速に圧縮される。この断熱圧縮により圧力調整器内の酸素が高温となり、油脂や可燃物が加熱され着火することがある [21-25]。関係した事例を表 3 に示す。事例 2-7 については、原因は不明であるが、救急活動中の負傷事例であるので、参考のために表 3 に加えた。

薩佐ら [26] は、異臭を伴ったパッキンの燃焼事故について報告している。充てん済みの人工蘇生器用酸素ボンベのそく止弁を救急隊員が開放し、酸素の臭気を確認したところ、通常無色無臭であるはずの酸素が強い刺激臭を有しており、さらに、パッキンが焼失していた。パッキンに用いられているフッ素系樹脂である三フッ化塩化エチレン樹脂が酸素加圧下で燃焼することにより、人体に有害な塩素、塩化水素、テトラフルオロメタンが発生することを確認した。

パッキンに使用されているフッ素樹脂が加熱され熱分解すると、有毒なガスが発生することは内藤 [27]、武島 [28] も指摘している。フッ素樹脂の熱分解生成物については、森崎 [29, 30] も報告している。

2.3　高温表面

工事中に、溶接器等のスパッタが火災原因となることは以前から指摘されてきた [35-39]。JIS Z 3001-2:2008 によると、スパッタとは、「アーク溶接、ガス溶接、ろう接などにおいて溶接中に飛散するスラグまたは金属粒」である。スラグとは、「溶接部に生じる非金属物質」である。溶接中に発生する火花もスパッタに含まれる。図 1 に工事に関連した火災における溶接・溶断機から着火物までの飛散距離を示す。スパッタは、遠くまで届き、かつ、可燃物を着火させることがあることがわかる。表 4 に関係した事例を示す。切削中に発生する切りくずも火災原因となりうることが指摘されている [40]。

ワット数が大きく明るさが強い電球では、条件によっては

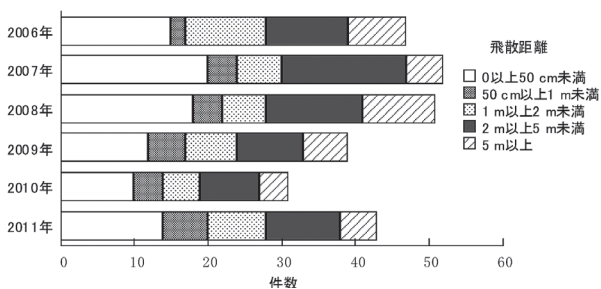



図 1　工事に関連した火災における溶接・溶断機から着火物までの飛散距離 [53]

着火源になりうるほど電球表面の温度が高くなる [41-44]。電球は本来、照明器具であり、発する光を遮るような物で覆ったり、囲ったりすることは想定されていない。本来の用途であれば、表面温度が高くても問題はないはずである。しかし、厚手の布団のような断熱材として作用するもので電球を覆えば、放熱が抑制され、電球の表面温度がさらに上昇する。その結果、電球を覆っている物を着火させることがある。

木材に関しては、長期加熱と低温着火により出火することがあると指摘されている [45]。木材が、長期間にわたり発火温度以下の低温度で加熱されると、徐々に炭化されて無炎燃焼を開始し、その後発火する現象を低温着火という。出火危険場所としては、次のような場所があげられている。

①　煙突等が貫通している壁体あるいは屋根
②　こんろ、レンジ類が近接している壁体、底面の台等
③　乾燥室内、スチームパイプの接触部分
④　サウナ室内のヒーター等の熱源周辺

煙突の内部には、高温の燃焼ガスが流れる。木造家屋の内部に、煙突を要するような燃焼機器を設置する際に、施工に問題があると、壁体貫通部付近の木材が加熱され出火することがある [45-48]。

走行中またはアイドリング中の内燃機関を搭載した自動車には、高温の部分が各所にある [49-51]。高温の部分が可燃物と接触すると火災となる危険性があることが指摘されている。

鉄板の片面で溶接をしていると、鉄板の内部を溶接の熱が伝わり、溶接している箇所の近くだけでなく、反対側の面も熱くなる。溶接している箇所の近く、または、反対側の面のすぐ近くに可燃物があると、可燃物が加熱され出火することがある [21, 52]。

2.4　熱線

十分に大きな凸レンズで太陽光を集光すれば、焦点に置いた紙が焦げる。これは小中学校の理科の実験として行われている [58]。また、凹面鏡で光を集め、火をおこすことは古くから行われてきた [59]。同様に、凸レンズまたは凹面鏡の作用をするものがあり、それが太陽光を集光し、焦点に可燃物があり、焦点に十分なエネルギーを集めることができると、可燃物が着火されることがある。収れん火災と呼ばれる。表 5 に収れん火災の出火箇所を月別、時刻別に示した。1980 年から 1983 年の間に東京消防庁管内で発生した 23 件の収れん火災を分類した。天候は、2 件が曇りだが、その他の 21 件は晴れまたは快晴であった。出火箇所の後ろに⑵がついているのは 2 件であることを示し、出火箇所のみで ( ) がついてないのは 1 件であることを示す。2006 年から 2011 年の間における東京消防庁管内における出火源別、月別の収れん火災の件数を表 6 に示す。表 5 と表 6 から、以下のようなことがみてとれる。

①　晴れの日に起きやすい。

表4　高温表面が着火源となったと推定された事例

番号	年月	都道府県	概要	出典
3-1	1999.8	東京	百貨店(耐火造15/4、延137,670 m²)の2階階段室から出火した。出火原因は、2階階段手すりの補修工事で、工事作業員が手すりを電気溶接器で溶接中、スパッタが約2 m下の階段下スペースのごみくず上に落下し、出火したことによる。作業員が溶接工事終了後、階段下から煙と炎が出ているのを発見し、立会いの警備員に知らせるとともに、警備員が防災センターに報告後、2人が協力して粉末消火器等8本を使用、その後駆けつけた他の警備員も屋内消火栓を延長し初期消火にあたった。出火した百貨店は休業日であったため、客は無く避難誘導等は行われなかった。溶接作業においては、スパッタの飛散防止のため難燃性シートを使用していたが、シートには所々穴があいていた。	53
3-2	1992.1	東京	16時52分ごろに、無届けの少量危険物貯蔵取扱所(簡易耐火1/0、延330 m²)から出火した。全焼2棟、363 m²焼損、傷者2人となった。潤滑油製造業の作業場で経営者が、オイルパンを作るために電気溶接器で作業をしていた際、スパッタが約2 m離れた所のオイルが染み込んだウエスに飛んで出火した。付近には、こぼれているオイルや油の染み込んだダンボールや灯油等があり、それらに燃え移って一気に燃え上がった。	53
3-3	1995.9	東京	17時40分頃に住宅の敷地内のごみから出火し、住宅の1階外壁8 m²、軒裏5 m²等焼損した。出火建物の西隣でマンションの新築工事が行われており、出火当日も15時ごろから17時ごろまで3階の鉄筋溶接工事が行われ、この溶接作業中にアセチレンガス溶接器のスパッタが、住宅の敷地内のごみ屑に飛び散り、着火して出火した。出火建物の北側にすむ主婦（54歳）が外から「パチパチ」という音がしたので窓を開けると、住宅の外壁が燃えていたので大声で「火事だ」と知らせた。マンション工事現場で作業中の作業（男35歳）が、「火事だ」という声を聞き、工事現場事務所の電話で119番通報をした。マンション工事現場で作業中の作業員（男23歳）と他3名が、「火事だ」という声を聞き、工事現場設置の粉末消火器6本と水道水につないだゴムホースで消火した。	53
3-4	1992.11	東京	11月19時37分ごろに倉庫(防火2/0、延80 m²)から出火し、半焼1、ぼや2の計3棟、40 m²焼損となった。アセチレンガス切断器のスパッタが解体中の倉庫の木ずり部分に落下し、無炎燃焼して出火した。タクシー会社の倉庫を解体中の社員（男50歳）が外壁の鉄製角パイプをアセチレンガス切断器で切断していた際、モルタル壁が剥がされ露出していた木ずりにスパッタが落下し、約3時間後に出火した。同一敷地内にある事務所棟で休憩を終えて出庫しようとした運転手(男35歳)が、倉庫の2階部分が燃えているのを発見し、事務所にいた営業課長（男45 歳）が119番通報をした。なお、発見時は2階全体が延焼中で、初期消火はされなかった。	53
3-5	2003.8	愛知	工場の従業員が、ポータブルグラインダーで鉄板を切削加工した際に発生した火花が、付近にあった灯油のしみ込んだ布を着火させた。さらにドラム缶から漏れだした乾燥炉の燃料（灯油）に延焼した。	54
3-6	1983.6	東京	共同住宅（耐火6/0）の十畳の居室に小学生の兄弟2人が布団を敷いて寝ており、兄が両親の部屋からもってきた白熱灯スタンドを布団のそばに置いて21時30分頃から弟と寝ながら本を読んでいた。本を読んでいるうちに寝てしまった。兄が息苦しくなってせきが出て目が覚めて、布団から煙が出ていることに気がついた。これにより、21時45分頃に、火災を発見した。死傷者はでなかった。寝返りをした際に白熱灯スタンドが倒れ布団に接触し、布団が無炎燃焼したと考えられた。白熱電球の表面温度を測定したところ、最高温度は、40 Wの電球では171 ℃、60 Wでは190 ℃、100 Wでは、237 ℃、200 Wでは275 ℃であった。	41
3-7	1989.4	神奈川	鉄筋コンクリート造の共同住宅の居室において、居住者の留守中に消灯していたタッチセンサーライト（100 V、40 Wの電球を使用）が何らかの原因により点灯した。電球を覆う球形の白色のプラスチック製セード（直径18 cm）がはずれていたため、電球に接触した衣類が着火した。電球の天頂部の表面温度を測ったところ、消費電力が39 Wでは点灯後5分後には225 ℃に達し、その後は定常状態になった。	55
3-8	2002.10	東京	共同住宅のベランダに立て掛けてあった折り畳み椅子に挟んだセンサライト（白熱球、100 W、一灯式）が何らかの原因により、下に敷いてあったすのこの上に落下し、点灯した。付近にあった繊維製品に接触し出火した。	56 57
3-9	1994.1	東京	20時44分ごろにホテル（耐火4/0、延415 m²）から出火した。ぼや1棟、布団1枚焼損となった。3階の客室の清掃をした際、従業員（女63 歳）他2名が天井からの水漏れを発見し、ベッドが濡れるのを防ぐためにベッドと布団を移動した。その際に布団が白熱灯の電球に直接触れたのに気付かずその場を離れたために時間の経過とともに、電球の熱により布団が加熱され出火した。同従業員が1階にいたところ、何かが燃える臭気を感じたので消火器を持って3階の窓から煙が出ていたのでフロントの係員に各客室の宿泊客に内線電話をして避難を促すよう指示した後、フロントから119番通報した。宿泊客20人全員はフロントからの内線電話により火災を知り、避難した。なお、自動火災探知機は設置されていたが、出火室では水漏れがあったために感知器を外しており、自動火災報知設備は作動しなかった。	53

3-10	1996.5	東京	13時23分ごろに作業所併用住宅（準耐火3/0 、延16,388 m^2）の3階住宅部分の台所の内壁から出火した。部分焼1棟、内壁2 m^2、天井1 m^{2}の被害がでた。3 階台所のガステーブルが置かれている背面壁体が、ガステーブルの火炎の発する熱により長い間加熱され、壁体内部が炭化状態となり着火し火災となった。ガステーブルを最後に使用して約1時間後に内壁より、火災となった。出火したガステーブル背面の内壁はベニヤ板張りで、ガステーブル周囲はステンレス板が張られていた。また、ガステーブルと背面の内壁との間は出火時16 cm離れていたが、ガステーブルが据え付け型でないことから、しばしば内壁に近寄った状態で使用されることもあった。ガステーブルの使用状況をみると、出火する1時間程前に、この家の主婦が15分程フライパン（直径24 cm）を使用して調理を行ったが、この時は内壁の異常に気づかず、そのまま1階の作業所に戻って作業をした。近隣者は自宅にいると外で「火事だ」という声がしたので、外に出て見ると出火した建物の3 階から煙が出ていたので粉末消火器をもって出火建物に行き初期消火をしたが、内壁から出火したため消火できなかった。	53
3-11	1992.12	東京	13時35分ごろに、飲食店（防火2/0、延96 m^2）の1 階調理場のガスロースターが設置されている側面の内壁から出火した。半焼1棟、50 m^{2}焼損となった。ガスロースターと内壁との距離が9 cmと狭かったため、約4年間使用している間に、ガスロースターの熱が壁内に伝わって内部の炭化が進み、焼き鳥を焼いているうち壁内から出火した。店員から店内が焦げ臭いと知らせを受けた料理長が、1階調理場のタイル壁の亀裂の隙間から炎が出ているのを発見し、消火器で初期消火をしたが消えなかった。店員から火災の知らせを受けた事務所の社員が、119番通報した。	53
3-12	1985.1	石川	17時43分頃に建築後3ヶ月の木造2階建住宅で、石油給湯器の煙突壁体貫通部のめがね石（30 cm × 4630 cm ×厚さ10 cm）を固定してあるぬきが煙突に接触していたため、出火した。焼損程度は部分焼（壁体等若干焼損）であった。	46
3-13	1985.1	石川	19時40分頃に建築後5年の木造2階建住宅で、石油給湯器の煙突壁体貫通部のめがね石（30 cm × 30cm ×厚さ10 cm）を固定してあるぬきが煙突に接近していた（3～7 cm）ため出火した。焼損程度は、半焼（1階内壁等20 m^2、2階26 m^{2}焼損）であった。	46
3-14	1995.7	東京	自動車整備工場から所有者に小型自動車（平成元年式、排気量3000 cc）を納車するために国道を走行していた。車のボンネットの隙間から白煙が出てきた。急いで車を道路脇に停めたところ、煙は黒い色に変化し、エンジンルーム下部からも煙が吹き出し始めた。エンジンルーム内に置き忘れた、タオル地の繊維状のものが走行時の振動により、高温になった排気管の上に落下した結果、時間の経過とともにタオル地が着火したと考えられた。	49
3-15	1988.6	神奈川	H埠頭の岸壁に貨物船（9,431 トン）が停泊していた。9時半頃に、2号船倉内で3人の業者が荷崩れ防止用の固定用リングを、3号船倉との境の隔壁に、電気溶接をした。隔壁の厚さは11 mmであった。12時45分頃に、3号船倉の内壁に隙間無く接して積まれていた煙草草の梱包から出火した。人的被害はなかったが、煙草草約1千トンの内、約2百トンが焼損した。溶接の熱が、隔壁内を熱伝導で伝わり、隔壁の反対側の温度が上昇した。そのため、内壁に接した積まれていた梱包が着火した。	52

表5　収れん火災の出火箇所[61, 62]

時刻	月											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
9時～10時										居室		
10時～11時	ベランダ（2） 居室（2）								ベランダ			
11時～12時	居室	ベランダ		ベランダ	建物外周部					ベランダ	居室	
12時～13時	居室				ベランダ				外壁		居室（2）	
13時～14時	居室			廊下								居室
14時～15時	居室						縁側					
15時～16時				敷地内								
16時～17時				敷地内								

（2）は2件であることを示し、出火箇所のみで(　)がついてないのは1件であることを示す。
1980年から1983年の間に東京消防庁管内で発生した23件の収れん火災を分類した。
天候は、2件が曇りだが、その他の21件は晴れまたは快晴であった。

表 6　収れん火災の件数[53)]

年	件数														
	種類			月											
	凸	凹	反射板	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2006	1	1		1							1				
2007	2	3	1		1				1		3			1	
2008		3		1									1	1	
2009	4	2				1		1	1		1	1		1	
2010	3	3		2				2	1					1	
2011	3	3		1		1	2					1	1		

凸 : 凸レンズまたは凸レンズと同様の作用をしたもの
凹 : 凹面鏡または凹面鏡と同様の作用をしたもの

② 季節にかかわらず、起こりうる。
③ 昼ごろが起こりやすいが、昼の前でも、昼の後でも起こりうる。
④ 居室またはベランダで起こることが多いが、可燃物が置かれている場所であれば、どこでも起こりうる。

凸レンズまたは凹面鏡の作用をするものとしては、以下のように様々なものが報告されている。

① マスコットをガラスにつけるための透明なカーアクセサリーの吸盤[60-62)]
② 透明プラスチック製肩叩き棒[63)]
③ 出窓に置かれたリンゴ形のガラス製置物[64)]
④ 筋力トレーニング用のウォーターアレイ[65)]
⑤ 温室の透明フイルムに雨水が溜まってできた半球状の水たまり[66-69)]
⑥ 自動車用アルミホイール[70)]
⑦ 中に水の入った透明な円筒形容器[71-75)]
⑧ 球形の金魚鉢[61, 62)]
⑨ 水栽培びん[71)]
⑩ 化粧鏡（片面が凹面鏡になっており顔が大きく映る両面鏡）[76-78)]
⑪ 太陽熱ゆで卵作り器[79)]
⑫ スチール製ボール[80)]
⑬ ステンレス製ボール容器[81)]
⑭ アクリル製ミラー電気傘[61)]
⑮ 装飾用ミラーボード[61, 62)]
⑯ 炊飯器、なべの蓋[61, 62)]
⑰ よく磨かれた鍋[61, 62)]
⑱ 石油ストーブ反射板[71)]
⑲ 鏡面仕上げの外壁板[82, 83)]
⑳ 凹面状外壁の熱線反射ガラス[84, 85)]
㉑ サンルームの屋根の内側に貼られた銀色の視線防止フィルム[83, 86)]
㉒ 拡大鏡付き虫かご[61, 62)]
㉓ テレビに取り付けられた画面拡大鏡[54)]

重要なのは、太陽光を集光できる形状をしていて、焦点に十分なエネルギーを集められるかどうかである。人間がどのような用途で使用しているかではない。なお、太陽の高度と方位を知りたい場合、計算による方法[87)]と、Internet 上のソフトウェアを利用する方法[88)]がある。太陽光以外にも、レーザーのビームが着火源になることがある。レーザーのビームには以下のような特徴がある[89)]。

① 単色性がよい。単色性とは、いろいろな光が混ざり合っておらず、どのくらい純粋な1つの光であるかをいう。
② 指向性がよい。指向性とは、光が一定方向にどのくらいひろがらずに進むかをいう。
③ 干渉性がよい。干渉とは、位相の相違によって、明暗の縞を発生する現象である。
④ エネルギー集中度および輝度性がよい。太陽の光をレンズで集めても紙や木を焼く程度だが、レーザーの場合にはエネルギーの集中度がよいため、鉄板を切ることもできる。

太陽光線では、レンズの焦点でなければ着火は難しいが、レーザーのビームであれば、もともと指向性とエネルギー集中度がよいので、離れたところにあるものでも着火させることがある。鉄板を切ることができるようなパワーのある加工用レーザーの普及が進んでいることもあり、レーザーによる労働災害等を防止するための安全対策については、いくつかの資料がある[90-92)]。表 7 に関係した事例を示す。なお、レーザー加工機からでる火花が着火源になることもある。レーザーは医療現場でも広く使われている。レーザーのビームが手術で使われるプラスチックチューブに照射されると、プラスチックチューブを発火させる危険性があることが指摘されている[93, 94)]。また、手術で使用されるレーザーが、布、シートを着火させ、患者も火傷を負ったことが報告されている[95-97)]。レーザーは、可燃性予混合気[98)]、可燃性粉じん[99)]を着火させるためにも使用されている。可燃性予混合気や可燃

表7　熱線が着火源となったと推定された事例

番号	年月	都道府県	概要	出典
4-1	n	京都	炭酸ガスレーザーを利用するレーザーカットマシンで、ABS樹脂の加工をしていた。自動運転であったために、従業員がその場を離れていた。レーザーのビームの波長は、10.6 μm で、レーザーの出力は500 W であった。加工材の切り屑がワークテーブル上に堆積し、レーザーのビームの照射により着火した。レーザーカットマシンが焼損した。	103 104 105
4-2	1995.7	愛知	大学で学生が研究開発中の光デバイスの評価実験をしていた。YAG レーザー発振装置によりレーザーのビームを発振し、実験試料にレーザーのビームを入射させるために反射鏡により光軸を調整していた。レーザーのビームの波長は、1.06 μm で、レーザーの出力は約4 W であった。反射鏡から4.2 m 離れたところにある暗幕にレーザーのビームが照射されて燃えだした。	106
4-3	1990	東京	共同住宅の玄関ホールとリビングルームを仕切る木製の長尺扉の子扉を開放していた。子扉がダウンライト（80 W）の直下であったために、子扉の上部が円弧状に焼損した。ダウンライトと扉の上部の間隔は2 cm であった。	100

n: 記載無し

性粉じんのある場所の近くでの使用にも注意が必要である。

電球のように、本来、光が散乱するようにつくられているものでも、電球のすぐ近くに可燃物があれば、電球の表面に触れなくても、可燃物の温度が上昇し着火に至ることもある。例えば、ダウンライトから2 cm 離れたところにあった板がダウンライトの発する熱で火災になったことが報告されている[100, 101]。劇場用の照明装置が5 cm 離れたところにあった舞台幕を着火させたという報告もある[102]。

2.5　電気火花

電気回路等から電気火花が生じた場合、そのエネルギーが十分に大きければ、周囲の可燃性予混合気、可燃性粉塵などを着火しうる。どのような条件であれば、電気火花が可燃性予混合気、可燃性粉じんを着火するのかについては、多くの研究があり、本にまとめられている[107-110]。電気機器・電気配線が着火源にならないようにするための対策については、解説[111]、指針[112-115]にまとめられている。

なお、萩本ら[116]によると、電気配線の短絡時には、次の要素が着火に寄与する。

① 溶断前の素線の赤熱
② 溶断後におけるアーク放電の周囲に生じる高温ガス
③ 溶融飛散する火花粒子

萩本ら[116-118]は、どのような条件で固体が着火されるのかについて、実験と解析により検討している。

2.6　静電気火花

二つの物体表面の密接な接触とそれに続く分離またははく離により、静電気が帯電する。二つの物体のうち一方または両方が絶縁体であるか、または大地から絶縁された状態にあると、電荷が蓄積する。その結果、電圧が数千V から数万V に達する場合がある。条件によっては、静電気火花が生じる。静電気火花は、可燃性予混合気を着火しうるだけのエネルギーをもつことがある[119, 120]。

炭谷[121]によると、可燃性液体の火災が静電気によりおこるには以下の4条件すべてが必要である。

① 帯電し、電荷がある程度以上蓄積し、火花放電が起こること
② 放電のエネルギーの大きさが、周囲に存在する空気と可燃性液体の蒸気の混合ガスの着火に十分であること
③ 周囲に存在する空気と可燃性液体の蒸気の予混合気の濃度が可燃範囲内にあること
④ 可燃範囲内にある予混合気が存在するところで火花放電があること

北川[122]は、爆発火災の原因が静電気であることを証明するには、次の3条件すべてが必要であると述べている。さらに、安易に着火源を静電気にしてしまうことを戒めている。

① 静電気が発生し、それが蓄積する条件がそろっていること
② 静電気の荷電が放電を起こすのに適当な電極となるものが具体的に存在すること
③ 静電気の放電エネルギが、着火エネルギーを与えるのに十分な大きさであること

炭谷と北川は、表現は異なるがほぼ同じ内容のことを述べている。どのような作業により静電気が蓄積され、静電気によりどのような災害が生じるかの詳細については、文献123から132 を参照されたい。工場・事業所における静電気による災害の防止対策については、指針[133, 134]を参照されたい。

2.7　裸火

燃料の種類、火炎の形態（拡散火炎か予混合火炎か）、火炎の用途、火炎を保持するための方法により、裸火は様々なものがある。最初に、ろうそくについて説明する。表8に関係した事例を示す。幅広い年齢層の人が、宗教上の行為、礼拝等に使用するため、ローソクによる火災は比較的多く発生している。また、明かり取りの目的で使用されることもある。図2に、ろうそくの使用目的を示す。ろうそくを灯明や照明に使用することは昔から行われてきたが、ある時期からアロマテラピー用ろうそくが使われるようになってきた。アロマテラピーが一般的になってくるにつれて、アロマテラピー用ろうそくが火災原因となることも一般的になった。

ろうそくは、以下の①から④のサイクルが維持されるときに燃焼を継続する[135]。

① パラフィンやエステルからできたろうが加熱され溶けて、芯

表8　裸火が着火源となったと推定された事例

番号	年月	都道府県	概要	出典
7-1	2006.10	東京	耐火造共同住宅（2/0）の2階の居室から出火し、建物部分焼1棟、25 m² 焼損となった。居住者がアロマテラピー用ロウソクをテーブル上に直接立てて使用していた状態で、炎を消し忘れて就寝してしまったために炎がテーブルクロスに着火して出火した。	53
7-2	2005.6	東京	防火造店舗併用住宅（2/0）の2階の居室から出火し、建物半焼1棟、ぼや1棟計2棟、70 m² 焼損となった。居住者がプラスチック製の衣装ケースの上にアロマテラピー用ロウソクを立てて使用していたため、その場を離れているうちにロウソクが転倒し、衣装ケースに着火した。	53
7-3	2004.12	東京	防火造住宅（2/0）の1階の居室から出火し、建物全焼1棟、42 m² 焼損となった。居住者がガラス製の灰皿にアロマテラピー用ロウソクを立てて使用したが、ロウソクの火を消さずに外出したため灰皿が熱により割れ、火の着いたろうが床に飛び散ったために出火した。	53
7-4	1996.7	東京	23時05分ごろ倉庫併用住宅（耐火3/0、延308 m²）の2階居室から出火した。着衣が若干焼損し、負傷者は2人であった。火元者の母親（90 歳）が、仏壇のローソクの火を消そうとした時、ローソクの炎が着ていたパジャマに触れたため着衣に着火し、火災となった。	53
7-5	1996.11	東京	20時20分ごろに共同住宅(耐火2/0、延464 m²)の2階の風呂場から出火した。被害は、ぼや1棟、負傷者1人であった。居住者の外国人（女29 歳）が、入浴のため、浴槽にお湯を入れている最中に照明の電球がきれ、予備の電球がなかったことから、ローソクを洗面台のプラスチック製の棚に立てて入浴し、ローソクを消し忘れたまま外出したため、ローソクが燃え尽きプラスチック製の棚に着火して火災となった。帰宅後、室内に濃煙が充満し、プラスチック製の棚が燃え尽きているのを発見した。通報は当初行われず、火元からの水漏れを知らせにきた建物の所有者(男62歳)が、火災を発見し通報した。	53
7-6	2011.10	東京	複合用途建物（物品販売店舗・共同住宅、耐火造2/0、延240 m²）の1階物品販売店舗から出火した。店員が、レジカウンター脇の流しで洗い物をしていると臭いがしたので商品陳列棚を見て、棚上方に煙と炎を発見し、店内の消火器を使用して消火した。さらに来店した男性客3人がポリバケツやゴムホースで水をかけて消火した。バックヤードで休憩していた別の店員が、火災を発見した店員から火災の知らせを受け、自分の携帯電話で119番通報した。店員が使用したセロハンテープ台を商品陳列棚に戻した際、陳列棚に置いてあった電子ライターのスイッチが押されて着火したため、ライターの火が陳列棚に着火したことによる。	53
7-7	2010.10	福岡	移動タンク貯蔵所（容量:3,600リットル）のタンク内部に付着した油分を、パーツクリーナー(第4類第1石油類)で除去した。2から3時間経過後に、タンク内部を確認するために照明としてライターを着火したところ、タンク内に残在した可燃性蒸気と空気の可燃性予混合気に着火し、爆発した。火災現場にいた自動車整備工1名が負傷した（中等症）。	155
7-8	2003.4	広島	ガソリンスタンドの営業時間終了後の21時頃、従業員が地下貯蔵タンク（内容物:ガソリン、容量:10キロリットル）の残量を確認するため、タンク上部のマンホール内の液面計を覗こうとした。暗くてよく見えなかったため、明かり取りにライターを着火したため、マンホール内に滞留していたガソリン蒸気と空気の可燃性予混合気に着火した。従業員1名が顔面に熱傷を負った（軽傷）。	156
7-9	1996.12	東京	12時06分ごろに、共同住宅（防火2/0、延146 m²）から出火し、小屋裏15 m²、壁体5 m² が焼損した。居住者の会社員（女33歳）が18時頃、布団をたたむ際にくわえたばこをしていたが、たばこの火種が布団上に落下したのに気づかずに外出してしまったため、長時間無炎燃焼を継続して翌日の12時06分ころ(約18時間後)に火災となった。同じ共同住宅2階居住者（男29 歳）が、前日22時ころからきな臭いにおいを感じていたが特に気にせず就寝し、翌日12時すぎに目を覚ますと、きな臭いにおいが激しくなっているとともに、自室の壁付きコンセントのすき間から煙が出ていたので火災に気付いた。初期消火は行われなかった。	53

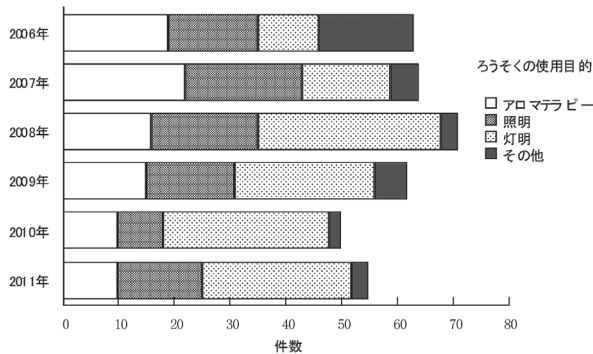



図2　ろうそくによる火災における使用目的[53)]

のまわりにたまる。

② 芯に吸い上げられ、芯の中を移動する間に加熱され、気化して、気相中にでる。

③ 空気中の酸素との間で燃焼反応を起こし、火炎が形成され、熱を発生する。

④ 火炎からの熱により、ろうが加熱される。

さらに、火炎、芯、溶けたろうの位置関係が変わらないときに、ろうそくは安定して燃焼を継続する。芯が変形して火炎がロウに近づくなどのことにより、ろうが受けとる熱が増加すると、多量のろうが溶けて、液面燃焼になることがある。この場合、安定に燃焼しているときに比べ、火炎が大きくなることがある。このことは、小学校の燃焼に関する授業の題材にもされている[136)]。

アロマポットの中でろうそくを燃焼させた場合、条件によっては、火炎が異常に大きくなることが報告されている[137-144)]。アロマポットとは、上部が皿状になっており、その部分に芳香材料を数滴垂らした水を入れ、下部の空洞状の部分にろうそく等を置き燃焼させることで芳香を発散させるものである。素焼きの容器の中でろうそくを燃焼させた場合でも、火炎が異常に大きくなることが報告されている[145, 146)]。

ろうそくによる火災の経過を図3に示す。ろうそくの火から火災に至るには、接炎、落下、転倒など様々な経過をたどる。実験を行った結果[147, 148)]をみると、どのようなろうそくがどのように落下したか、どのように転倒したかにより、燃焼が継続するかどうかは変化した。

ロウソクを燃焼させる際には、適切なろうそく立てが必要である。火のついたろうそくをプラスチック上に放置すると、プラスチックが着火されることがあるという報告がある[147-149)]。

どのような目的にせよ、ろうそくに火をつける際には、以下の基本的な事項[53)]を忘れてはならない。

① ろうそくは、不燃性のお盆や台上で使用し、使用中はその場を離れない。

② ろうそくは、燭台の大きさに合ったものを使用し、倒れることのないようにする。

③ そうそくの炎は、燃焼とともに下に動くことから、周囲に可燃物を置かない。

携帯用簡易ガスライター（通称、ライター）が、消火操作をしたはずなのに火が完全に消えずに、着火源となったことがある[150-153)]。ライターに使用者が意図しない何らかの力が加わって点火し、周囲の可燃物を着火させたこともある[154)]。また、ライターは本来着火具であるが、照明装置の代用として使用する人もいる。可燃性予混合気のある場所の近傍で、照明として使用することにより、可燃性予混合気を着火させることもある[128, 155, 156)]。なぜこんなことをするのだろうかと不思議に思うだろうが、事例7-7、7-8のような火災は、昔も今も起きている。

たばこは慣例により裸火として扱う。消防庁の昭和44年度の統一防火標語は、「今捨てたタバコの温度が700度」であった。たばこの燃焼温度は、たばこの種類（紙巻きタバコか、パイプか）、銘柄、たばこの向き（上向きか、水平向きか）、通気状況（口にくわえて吸引しているか、静置しているか）などにより異なる。表9にたばこの燃焼温度の測定例[157)]を示す。燃焼温度は、表9を見る限りにおいては、700℃前後ではある。しかし、条件によりばらつくこともわかる。過去の火災実験の結果[158-164)]からみると、火のついたタバコが着火源となるかどうかは、通気状態、タバコの銘柄、可燃物の種類、可燃物の湿り具合、可燃物との接触の仕方など様々な条件に依存する。たばこによる火災では、図4に示すように、たばこが原因となった火災では、出火に至るまでの時間がばらついてい

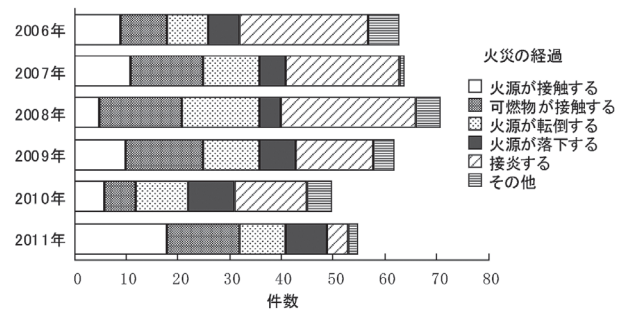



図3　ろうそくによる火災における火災の経過[53)]

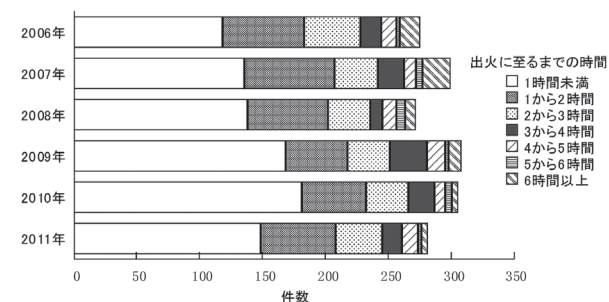



図4　たばこによる火災における出火に至るまでの時間[53)]

表9　たばこの燃焼温度[157)]

燃焼の方向	自然燃焼時の内部の最高温度 [℃]	バット (13本)	新生 (8本)	光 (8本)	ピース (8本)
水平に固定されて燃焼	最高	745	685	720	750
	平均	617	650	669	724
	最低	560	600	605	715
鉛直に固定されて下から上に燃焼	最高	785	755	770	810
	平均	741	712	706	744
	最低	710	640	695	670

( ) 内の数値は、各銘柄ごとの試料の数

る。事例7-9のように、18時間要している事例もある。これらのことが示すように、たばこ火災の再現実験は、時間がかかるだけでなく、多くの条件に依存するので、多大な労力を伴うことが予想される。

2.8 自然発火

2.8.1 自然発熱と自然発火

自然発熱とは、他からなんら熱を与えないで、物質が常温の空気中において自然に発熱する現象である。例えば、使い捨てカイロは鉄粉の自然発熱を利用している[165, 166)]。その熱が放散しないで、さらに温度上昇を促し、十分に温度が高くなると燃焼を起こす現象が自然発火である[119)]。身の回りにある多くのものが条件がそろえば自然発火しうる。例えば、京都市消防局では、56品目の自然発火性を解説している[167)]。

2.8.2節では、自然発熱を発熱の速さという観点から分類してみる。2.8.3.節では、自然発熱を反応の種類から分類してみる。反応の種類として、酸化反応、分解反応、発酵作用、水との反応、混触による反応、重合反応があげられる。関係した事例を表10に示す。

表10　自然発火が着火源となったと推定された事例

番号	年月	都道府県	概要	出典
8-1	2000.6	大阪	昼頃、塗装用刷毛の軟化剤として使用していたボイル油を小型貨客自動車の荷台にこぼしたので、これをウェスで拭き取った。ウェスをビニール製の土のう袋に入れ、車両後部の荷台に放置した。翌日の夜に荷台から出火した。調査したところ、ボイル油のヨウ素価は148で、乾性油であった。	178 179
8-2	1988.1	神奈川	午前中に中学校の工作室（鉄筋プレハブ平屋建）で、チークオイルをタオルに染みこませ木製折り畳み椅子のつや出し作業を行った。18時46分頃、無人の工作室から出火し、工作台、ウェス等を焼損した。チークオイルを木部に塗布後、ウェスを丸めて通風の悪い条件で放置したため、ウェスに染みこんだチークオイルが酸化発熱し、蓄熱が進み、約6時間後に出火した。 使用されたチークオイルの組成は以下の通りであった。 油性ワニス（アマニ油）60%，乾燥剤1%，油剤（テレピン油）39%	180
8-3	1998.4	大阪	木製品塗装工場においてウェスにチークオイルをしみ込ませて塗装の仕上げ作業を実施後、このウェスをポリ容器に入れそのままにしておいた。約9時間後に火災が発生し、このウェスとポリ容器、付近の塗料缶、天井、側壁を焼損した。チークオイルのヨウ素価は109で、半乾性油であった。チークオイルの組成はアマニ油が74.5 %を占め、他は溶剤と乾燥剤であった。	181
8-4	1997.7	大阪	水産物卸店で、鯨を解体する際に包丁をふいたタオル約20枚を発泡スチロール製の箱に入れ、そのままにしておいた。約10時間後に火災が発生し、このタオル数枚と発泡スチロール製の箱が焼損した。鯨油のヨウ素価は、2回測定したところ137、136であり、乾性油であった。	182
8-5	1999.5	大阪	エステティックサロンにおいて、スイートアルモシド油を瘦身美容に使用した後、その油を拭き取ったタオルを洗濯機で洗浄後、電気乾燥機に一杯に詰め込んでスイッチを入れて帰宅した。約12時間後に電気乾燥機から出火した。調査したところ、スイートアルモシド油のヨウ素価は102で、半乾性油であった。	192
8-6	2005.7	東京	耐火造（9/1）の複合用途の建物3階の従業員室から出火した。床1 m²、乾燥機1、洗濯機1、バスタオル等が焼損した。出火した場所は、マッサージ店従業員室の乾燥機内部からであった。出火した日は、従業員が洗濯後のバスタオル5枚程度をおよそ40分間乾燥機で乾燥させた。その後、乾燥機の電源を切り蓋を開けた状態で退社したが、タオルからの放熱が十分ではなく、約2時間後に余熱により自然発火した。	53
8-7	2003.11	東京	3時ごろに、クリーニング業者の雑品倉庫1階（準耐火造3/0、延362 m²）から出火した。建物部分焼2棟70 m²、外壁等53 m²が焼損した。乾燥機の担当者が休みだったので、代わりの従業員（外国人）がアーモンドオイルの染み込んだタオル150枚を乾燥機の中に入れて乾燥させ、高温のまま山積み状態で1階倉庫内に置いていたため、洗濯では十分に落ちなかったアーモンドオイルがタオルの余熱により着火した。出火建物建物2階に居住する従業員が就寝中、煙と匂いで目を覚まし、窓を開けてみ	53

			ると 1 階から炎が上がっているのを発見した。すぐに自分の携帯電話で 119 番通報した。なお、初期消火は行われなかった。この倉庫では、通常アーモンドオイルの染み込んだタオルは、別工程で洗濯乾燥し、1 枚ずつ袋に入れるという作業を行うことで余熱をとり出火防止を行っていたが、担当者が休みで、別の従業員に行わせたため出火した。	
8-8	1989.4	東京	病院食堂の厨房で出火した。天井 1 m²、ラック 1 個、プラスチック容器 1 個、揚げ玉 3kg が焼損した。原因は揚げ玉の自然発火とされた。経過は以下のようなものであった。17時から 18時10 分ごろまで、調理師がそば種に使用する揚げ玉約 3 kg をふたのないプラスチック容器（44 cm x 28.5 cm、深さ 28 cm）に移した。空調の風に 40 分間当てて冷ました。 19 時 15 分頃、厨房内のスチール棚の上段に揚げ玉を入れた容器を置き帰宅した。 21 時 59 分頃、自動火災報知器のベルが鳴動し、病院の警備員が火災を発見した。	196
8-9	2003.5	神奈川	木造 2 階建ての店舗併用住宅の 1 階がお好み焼き店であった。アルバイト店員が調理場内のフライヤー（設定温度 180 ℃）で、出火前日の 16 時 30 分頃から 19 時 30 分頃までに、接客などの他の業務をしながら揚げ玉を揚げた。その後、調理場内に置かれた。出火当日の 0 時頃に店を閉め、施錠し、店内は無人となった。居住者が 2 階において、焦げた臭いを感じ、屋外に出て、1 階お好み焼き店の換気口から白煙がでているのを見て、2 時 58 分頃に火災を発見した。現場に到着した消防隊が窓ガラスを破壊し、お好み焼き店に進入したところ、調理場内の金ザルに入れられた揚げ玉が赤熱していたため、調理場の水道ホースを使用して消火した。金ザル内に多量に作り置きされた揚げ玉が自然発火したとされた。	197
8-10	1984.9	東京	9 月初めに、美術館のフィルムセンターの 5 階、映画フィルム専用の保管庫から出火し、同保管庫および廊下など 83 m² を焼損した。庫内には外国の映画フィルムが約 3,000 巻保管されていた。保管庫内のフィルムは、昭和 27 年以降に収集したもので、ほとんどが不燃性のものであったが一部にセルロイドベースのものが混入していたと考えられた。庫内は専用の空調機により、温度は 20 ～ 25℃、湿度は 50 ～ 60% に保つようにし、フィルムの変質を防止することになっていたが、休館日は常にオフにされ、出火前日から当日までも空調機はオフにされていた。同保管庫内奥の棚上に保管されていた 16 mm セルロイド映画フィルムが悪環境下（高温）で自然発火した。	199 200
8-11	1967.4	広島	卓球台脚を製造する工場（木造 2 階建、建築面積 125 m²）において、ガスボンベ置き場で発炎しているのを、溶接作業中の作業員が発見、通報した。到着時にはボンベから猛烈に噴炎中で、延焼阻止を行った。アセチレンボンベ 3 本を屋外に運び出し、残り 1 本を捜索中に、ボンベが爆発した。人的被害は以下の通りであった。 死亡　消防吏員 2 名 1 名両大腿切断により死亡 1 名内臓露出断裂により即死 重傷　消防吏員 1 名（右大腿骨折、全身打撲） 消防団員 4 名（顔面火傷、視神経・鼓膜損傷） （顔面火傷、左下肢打撲） （顔面火傷、左手・左下肢打撲） （顔面・右肩・両手・左下肢爆創） 中傷消防吏員 3 名、消防団員 1 名、他 3 名 軽傷消防吏員 1 名、消防団員 4 名、他 6 名	209
8-12	1969.5	兵庫	作業場（木造 2 階建）より出火した。作業場内にノコギリの目立用として置いてあったアセチレンと酸素ボンベ各 1 本があった。火災の熱により酸素ボンベの安全弁から火を出し、それがアセチレンボンベを加熱した。その結果、アセチレンボンベが破裂した。ボンベの破裂により飛んできた調整器が、約 5 m 離れて消火活動をしていた消防士の保安帽につきささり死亡した。他に 1 名傷者を出した。	31
8-13	1988.1	富山	22,000 m² の燃料開発会社の敷地の大部分に、約 20 m の高さで、28 万トンのバークを野積みしてあったもので、この堆積したバークの内部から自然発火したと推定された。消火作業のためバークの山を掘削すると表層より内部の焼き範囲が広大な状況であった。火災原因調査のため敷地内に野積みされたバークの内部温度について表面から 70 cm の深さまで 7 箇所を測定すると、40 ～ 60 ℃で、最も高いところは 74 ℃であった。	215
8-14	1988.12	石川	バークコンポスト製造業者が、山間の落差 30 m の谷間を利用してコンポストを作る目的で約 32,000 トンのエゾマツのバークを投棄した。谷間に大量に堆積したバークの内部から自然発火したと推定された。翌年 4 月に現地調査した時点では、自然発火による燃焼箇所から離れた、新たなバーク投棄箇所から盛んに水蒸気が立ち上っており、この部分のバーク内部温度を測定すると、表面から 30 cm までの探さでは 40 ～ 60 ℃、70 cm では 73 ℃、1 m の探さでは 79 ℃であった。	215
8-15	1977.10	北海道	焼損建物は牧草収納庫 * 一棟、焼損物件は、牧草のロールベーラ **608 個及び大型巻取機 *** 等である。牧草、しかも一個 700 kg もある機械で強く巻きあげたロールベーラは、水の浸透が悪く、表面の燃焼を押えたかに見えても、僅かな残り火で次々と燃え出した。このロールベーラが、収納庫内に、三段積みで、608 個収納されていた。放水しながら、柱にワイヤーをかけ、トラクターで除去した。屋根、壁も除去した。放水しながら、大型湿地用ブルドトーザーでロールベーラを突き崩し、踏みつぶした。さらに、大型ユンボを使い穴を掘って埋めた。 出火原因は自然発火と推定された。	217 218

			* 木造平屋、波トタン外壁、トタン葺、1,320 m^2、約 15 m × 91 m。 ** 乾燥した牧草をロール状に巻いたもの。形状は、直径長さとも約 1.5 m で、一個 700 kg。 *** 外国製で、牧草をロールベーラにする機械。	
8-16	1989.4	福岡	サイロ内部で火災が発生した。火災が発生したのは、牧草をサイロに入れて乳酸発酵により乳牛飼育用の飼料を作るのに使用される気密サイロで、形状は縦型円筒形タンク（鋼板、両面ガラスコーティング、有効容積 293 m^3）であった。消防ポンプ自動車 2 台、指揮車 1 台、救急車 2 台、人員 16 人、消防団、消防ポンプ自動車 1 台、人員 20 人が出動した。消火活動中、突然轟音と共に爆発した。消防職員 3 人（重症 1、中等症 2）が負傷した。 出火原因は自然発火と推定された。畜産用サイロ（密閉式）に、水分含有率 30 ～ 40 ％と推定されるヘイレージ（低水分飼料）が約 100 m^3 が貯蔵されていた。2 日前 19 時頃、サイロの飼料取出口の蓋を開け開放状態で放置した。前日 12 時頃、サイロルーフのセンターハッチ（直径 60 cm）とサブハッチ（直径 43 cm）を開け開放状態で放置した。サイロに空気が流入しヘイレージが変敗し発熱したと推定された。また、サイロ内のヘイレージが不完全燃焼し、それによって発生した可燃性気体がサイロ内に存在していた。噴霧注水によりサイロ内に流入した空気と可燃性気体が混合し、可燃性混合気が形成され、爆発したと推定された。 経過は以下のようなものであった。 所有者から「サイロの上部から煙がでているので調べにきてほしい」との通報により第 1 分隊 4 人で警戒出動した。 13:06　現場到着後所有者から状況を聴取すると、「煙が上がって中が燃えているようだが他の事は何もわからない、ルーフのマンホールから確認できる。」との返答を得て、分隊長がルーフに登り確認を急いだ。ルーフには、メインとサブのハッチがあり両方とも開放状態で、内部は白煙が充満し状況は見分できなかった。 再度質問すると、「飼料取出口から内部が見えるかも知れない。」とのことで、そこから内部を覗くと中央部付近が広範囲に燃焼していた。 13:16　飼料取出口から燃焼物を取り出しながらの消火を試みたが、周囲に可燃物が集積され、取出口が狭く内部機器が注水を妨げ効果が期待できないため、サイロ内部での消火を実施することとした。 注水は、ルーフハッチからと決定、高所であるため無人注水を行うこととし、A 隊員がルーフに登り作業を実施した。 13:17　隊員の増強と豊富な水量を確保のため第 2 分隊の出動を要請 13:29　第 2 分隊現場到着 13:35　第 2 分隊への中継送水を開始した。 13:36　第 2 分隊の B 及び C 隊員の 2 人がルーフ上で作業中の A 隊員と協力し新たにホースをルーフへ延長するとともにすでに注水中の第一線ホースの結着補強を行った。 13:39　作業を完了して降下を開始した直後、飼料取出口から突然「ブォー」という低い音と共に黒煙と灰塵が吹き出してきた。続いて「ズボー」という大きい音がしてサイロ上部が黒煙に包まれた。 13:40　サイロは、ルーフが吹き飛び胴板は、内側へ歪んでいた。サイロのステップ上部に A 隊員、その横の垂れ下がったサイロルーフステップに C 隊員が確保ロープに吊り下がり、B 隊員は、サイロ直下の飼料倉庫スレート屋根を突き破り地面へ落下していた。 爆発後のサイロの消火には、被災を免れた隊員と消防団が当たり、倒壊による二次災害を防ぐため筒先を固定して無人放水を実施した。 21:00　鎮火	219
8-17	2005.12	東京	作業場（耐火造 3/0、延面積 3,113 m^2）で火災が発生した。産業廃棄物処理施設の 1 階作業場内で最終処理された混合可燃ごみ（産業廃棄物）から出火した。出火原因は、火災発生前日に施設へ持ち込まれた生石灰 3 袋（約 1.5 トン）が破れて散乱したうえに粉塵防止装置等で散水したため、時間の経過とともに生石灰が水分と反応し発熱して周囲の可燃物に着火して火災に至った。敷地内の隣接する建物に宿直中の従業員が 1 階から作業場付近が明るく感じたので、窓越しに作業場内を見ると、混合可燃ごみから炎が約 30 ㎝上がっているのを発見した。すぐに従業員は自分の携帯電話から 119 番通報したが、初期消火は行わなかった。	53
8-18	1967.9	神奈川	木材、ボンベなどとともに、塩酸（藤巻びん入り、20 ㍑）1 本、および、硝酸（かめ入り、20 ㍑）1 本を、滋賀県から、東京都まで輸送するため、国道を走行中に、5 トン積みトラックの荷台から出火し、硝酸約 1/8 流出し、荷台の一部を焼いた。 硝酸のかめは、肩口にひび割れを生じた程度で、内容物が、周囲の木っ端、わらなどに漏れてしみていた。かめの中の残留物は、比重 1.45 以上、濃度が約 80 ％程度の発煙硝酸と認められた。容器が損壊して、硝酸が漏れだし、周囲にある充てん物、あるいは緩衝材としての、ワラ、木毛などの、可燃性の有機物質に浸透すると、急激な酸化作用のために、著しく発熱をする。これらの物質に保温効果が加わると、熱の拡散が妨げられるため自身が加熱されて分解発火する。このようにして出火したと考えられた。	226
8-19	1954.7	神奈川	シアン化水素中間試験場のドラフト室内を工事中、同室内に置いてあったシアン化水素ボンベ（内容積 46 ㍑）7 本のうち 1 本が突然破裂したので、工事中のもの 2 名のうち 1 名は室外に逃れたが、1 名が室内に倒れ死亡した。原因は、シアン化水素の一部が重合し、この重合熱により残余のシアン化水素が熱分解し、異常圧力を生じたものと考えられた。	262
8-20	1953.7	群馬	化学工場において、塩化ビニル溶液重合缶の冷却水が停電のため止まった。重合缶内で急激な圧力上昇があり、安全弁から噴出を始めた。全員が待避した後、重合缶が破裂し、重合缶の蓋の一部（約 400 kg）は約 200 m 飛んだ。重合の反応熱により爆発したと考えられた。	272

2.8.2　発熱の速さからの分類

2.8.2.1　発熱の進行が速いもの

急激に発熱するものが該当する。爆発を伴うこともあり、危険性も大きい。しかし、その危険性の発生条件が、水分の接触とか他薬品の混入とかいった単一的なものであれば、試験などの実験で確認することが比較的容易であり、また、法規制なども含めた予防対策も講じやすい。例えば、金属ナトリウム、カーバイドは、水と触れると発熱し、可燃性ガスを発生させる。黄リン、モノシラン[168-172]は空気中で自然発火する。いずれも消防法などの国内法による規制を受けている。ただし、国内法による試験で自然発火することが確認されなかったからといって、自然発火しないというわけではない。

2.8.2.2　発熱の進行がゆるやかなもの

最初は緩慢な発熱反応を続けるにすぎず、数時間から数日、ときには数週間にわたってゆるやかな発熱が進行し、蓄熱により温度上昇して反応も加速され発火にいたるものが該当する。自然発火を促進する条件としては高温、多湿、換気不良、たい積状態、異物の混入などがあるが、これらの中のある一つの条件のみの作用によって発火に至るということは少なく、各種の条件が相乗的に長時間作用してはじめて発火する。以下のような特徴がある。

①　発熱条件が単一でない。
②　発熱より発火に至るまで長時間かかる。
③　発熱部分は見えにくい場所が多いなどのため、危険性の実態が把握しにくく、不注意に取り扱われがちである。
④　早期発見が困難であり、火災の規模を大きくしがちである。
⑤　少量の試料を用いた、短期間の試験では、危険性を十分に把握できないことがある。

このようなことにより、法規制なども含めた予防対策が困難な場合がある。しかしながら、法規制がないということはユーザーが何をしてもよいということではない。ユーザーが自分で考えて、調べて、気をつけて使うべきである。

発熱する物質が断熱された容器に入れられたとすると、放熱することがないために物質自体の発する微小な熱でも温度を上昇させることになる。アレニウス式が示すように、発熱量は温度が上昇するにつれて指数関数的に増加する。そのため、物質の温度が上昇すると、急激に発熱量が増加する。このようにしてわずかな発熱によって、物質を自然発火させる。このような断熱された容器は現実には存在しないが、もし、大量の物質が山積みされていたとすると、山の中心部は近似的に断熱系を構成することになり、自然発火を引き起こすことになる。典型的な例が石炭[173,174]である。山積みの状態に限らず、繊維状、粉末状、または発泡状などの保温効果を持つ状態にあっても、自然発火は起こる。

2.8.3　反応の種類からの分類

2.8.3.1　酸化反応によるもの

油脂の酸化熱による自然発熱は一般的なものである。次のような条件を満たすときに、油脂が自然発熱しやすい。

①　油脂が酸化されやすい性質である。一般に、二重結合を有するものが酸化されやすい。二重結合の多さを示す数値がヨウ素価[175]である。
②　空気との接触面積が大きい状態にある。
③　酸化反応を促進するのに必要な温度にある。温度が低いと化学反応が進行しにくく、また、放熱しやすい。夏の暑い日が続くと自然発火が起きやすいとは言われるが、ボイラーの近くやエンジン部など、季節に関係なく熱源がある場所も自然発火の原因となりやすい。
④　反応熱が蓄積されやすい状態にある。

このように、自然発火するかどうかは、油脂がどの程度酸化されやすいかと周囲の環境に依存する。人間が、どのような用途に使用しているか、人間に対してどのような効能があるか、原材料は何か、ではない。常温における酸化されやすさを示す指標の一つとして、ヨウ素価が使われている。一方、自然発火のしやすさを知るための方法の一つとして、マッキー試験がある。清水[176]はヨウ素価とマッキー試験の結果の比較を行っており、その結果を表11に示す。マッキー試験の測定を開始する前の温度は28℃から32℃の間であった。開始から120分で終了とした。実験を通して、マッキー試験で150℃まで温度上昇するのに要した時間を自然発火の目安とし、大豆油のような例外はあるが、ヨウ素価が100を超えるものを自然発火の危険性ありとした。

油脂を含んだウェスは、上記の②と④を満たしており、自然発火した事例は以前から報告されてきた[177-186]。

油脂がしみ込んだ作業着、軍手、タオルなどの洗濯物に、洗濯後も油脂が残留することがある。衣類乾燥機で乾燥された後にその中に放置された場合、または、衣類乾燥機から取り出した後にかごの中に収納され放置された場合、上記の②、③、④の条件を満たし、出火することがある[187-194]。ただし、乾燥機の故障により衣類乾燥機内の洗濯物が燃え

表11　ヨウ素価とマッキー試験の結果の比較[176]

	ヨウ素価	マッキー試験の結果
大豆油	89.6	41分28秒で150 ℃に達した
アマニ油	184.8	43分45秒で150 ℃に達した
イカ油（原油）	186.2	67分50秒で150 ℃に達した
イカ油（精製油）	186.2	67分58秒で150 ℃に達した
3号ワニス	108.1	87分で150 ℃に達した
長須鯨油	105.7	110分20秒で150 ℃に達した
抹香鯨油	75.8	120分後に97.2 ℃に達した
ひまし油	89.0	120分後に95.8 ℃に達した

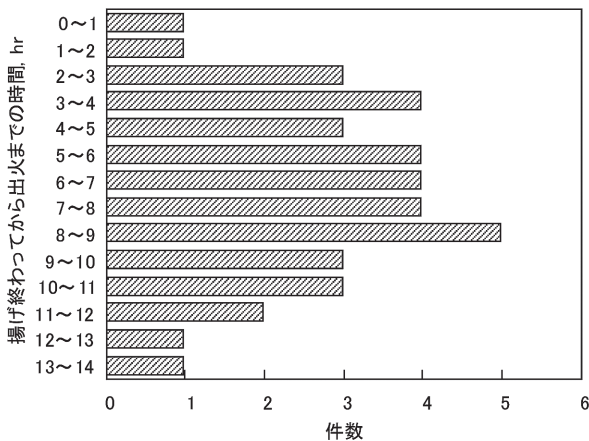



図5　揚げ終わってから出火までの時間[196)]

た事例も報告されている[195)]ので、衣類乾燥機の中で衣類が出火した場合に、自然発火を原因とする際には注意を要する。

高温の揚げ玉または揚げかすを山盛りにすると、上記の②、③、④を満たす[196, 197)]。揚げ玉、揚げかすの自然発火による火災について、揚げ終わってから出火するまでの時間[196)]を図5に示す。長い場合で、発火まで14時間近く要している。このことが示すように、仮にどこかの料理店で営業時間中に揚げ玉または揚げかすを高温のまま山盛りにしたとして、営業時間終了までに煙をあげたりしなかったとしても、営業時間終了後に煙をあげはじめないとは限らない。

2.8.3.2　分解反応によるもの

分解熱により自然発熱するものが該当する。夏に暑い日が続いたりすると、セルロイドでつくられていた古い映画フィルム等が自然発火することがある[198-202)]。セルロイドは、ニトロセルロースに樟脳を配合し、混和、圧搾、裁断、乾燥などの工程を経てつくられる[203-205)]。元来は無色透明であるが、熱、光、酸素の影響で透明性を失い、黄色化し脆弱になる。きわめて燃えやすい。温度、湿度、紫外線などにより自然に分解し、分解熱が蓄積すると自然発火することがある。セルロイド製のフィルムの自然発火は過去の出来事ではない。2012年9月に東京都内の住宅で発生したという報告がある[53)]。圧縮酸素とともに、溶接や切断に用いられているアセチレンは、加圧下では極めて不安定で火花、加熱、摩擦などにより自己分解を起こしやすい[203, 206-20)]。火災現場で、加熱されたアセチレンボンベが爆発し、活動中の消防職員が殉職した事例もある[31, 209)]。有機過酸化物は、産業において広く使われているが、熱、衝撃、異物との接触などにより爆発的に分解反応を起こすことがある。福山[210)]、幅[211-213)]が有機過酸化物の事故事例をまとめ、分析をしている。分解とともに発生する化学物質の中には、毒性があるものもある。また、分解反応により気体が発生する化学物質は、内圧の上昇により容器が破裂することも考慮する必要がある。例えば、98～100%のギ酸が貯蔵中にゆっくりと分解し、一酸化炭素が発生して、密封ガラス容器が破裂したことがある。ガス漏れがないと、2.5リットルのびんには25℃、1年間で7bar以上の圧力が発生する[214)]。

2.8.3.3　発酵作用によるもの

適度な水分と通気があれば、微生物の作用する発酵により温度が上昇する。それにより70～80℃程度まで温度が上昇すると言われている。温度が上昇すると水分が蒸発するので、微生物は不活性になるか死滅する。温度が十分に高くなっていれば、空気との酸化反応が起こる。条件によっては、さらに温度が上昇する。樹皮(バーク)[215, 216)]、牧草[216-219)]は、発酵作用により自然発火したことがあると報告されている。

牧草に関しては、予防対策として以下のことがあげられている[218)]。

① 発酵しない様に乾燥を良くして梱包する。
② 野積みで発酵熱を放散させ、2週間以上経過してから収納する。
③ 収納庫は空気の流通を良くし湿気を排除する。
④ 高く段積みする場合、桟木等で重圧及び空気の滞溜を防ぐ工夫をする。
⑤ 収納後は発酵の湯気や刺激性の臭いに注意する。
⑥ 収納庫に機械類を乾草と一緒に収納しない。
⑦ 大型収納庫より分散収納庫を考える。

上にあげた予防対策は、バーク、堆肥等にも応用可能と思われる。

発酵作用による自然発火は、長期間にわたり、大量に堆積された場合に、まれに起こる現象である。野積みしたものの火災の原因を、発酵熱による自然発火とするなら、最低でも、以下のことを確認する必要があると思われる。

① 野積みした場所の地勢
・地形、日照、風
　日当たりが悪く、風がよく当たるなら、熱が逃げやすくなるので、自然発火に不利になる。
・水はけ、降水量
　水分が多すぎると、発酵は阻害される。
② 野積みした場所の履歴
・積み始めからの期間
　発酵による自然発火には、長期間を要する。
・これまでに積んだもの
　油類、または、油分を含んだものは酸化発熱の原因となることがある。
・これまでに起きたこと
　発酵が起きたなら、なにかしらの発酵臭があったはずである。発酵が起き、温度が上昇したなら、湯気が発生する。発酵熱による温度上昇で、乾燥した後に、通常の酸化反応が開始される。酸化反応が開始されたなら、タールが生成し、焦げ臭

いにおいがする。酸化反応が継続したなら、発煙する。酸化反応がさらに継続したなら、発火する。発酵熱による自然発火ならば、火が出る前に、湯気、発酵臭、焦げた臭い、煙が出ていたはずである。

・圧密の状態

圧密すれば、空気が通りにくくなり、自然発火に不利になる。

③　出火場所の状況

・発火した位置

自然発火なら、野積みの山の内部から発火したはずである。

・発火した位置の周囲

消火活動、火災調査の際に、以下のような発火の前の現象が見えたか。

野積みの山の内部に、焦げて激しく発煙する場所はあったか。焦げて激しく発煙する場所を取り囲むように、焦げてはいるが、発煙が弱い場所があったか。焦げてはいるが発煙が弱い場所を取り囲むように、乾燥し、多少焦げているような場所はあったか。

野積みの山の断面を露出させたような写真があれば、一目瞭然である。

④　発災事業者の情報

・火災履歴

これまでに火災を起こしたことはないか。

・業態

事業者はどのような業態か。廃棄物の不法投棄を、販売用の在庫と称していたりしてないか。

なお、発酵作用による自然発火を小規模の実験で再現するのは困難である。

2.8.3.4　水との反応によるもの

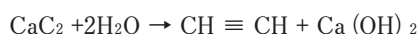
水との反応により著しい発熱反応を起こすものである。禁水性物質にあたる。次の 4 種類に分類することができる。

①　単に発熱するもの

生石灰（CaO）は、水分と反応し発熱する[220]。十分な量の生石灰が発熱し、かつ、周囲に引火しやすい可燃物があると、火災になることがある[203]。生石灰は土質安定剤としても使用されており、水との反応で火災の原因となることがある[221]。

②　反応により水素などの可燃性ガスを発生するもの

アルカリ金属である金属ナトリウムは水と反応し水素を発生する[222-224]。また、カルシウムカーバイド（炭化カルシウム）は以下のように水と反応しアセチレンを発生する。この反応は発熱反応であり、反応熱は、128 kJ/mol である。

$$CaC_2 + 2H_2O \rightarrow CH \equiv CH + Ca(OH)_2$$

③　反応により酸素などの支燃性ガス（酸化剤）を発生するもの

過酸化ナトリウムは、水により酸素を発生しながら発熱分解する。このため、酸素発生剤としても利用されている。

④　溶解熱あるいは希釈熱により発熱するもの

濃い酸やアルカリを水で希釈または溶解して試薬溶液を調製する際には、発熱を伴うことが多い。急激な発熱を避けるために、ガラス棒などでかき混ぜながら試薬を少しずつ静かに水に加える必要がある。例えば、硫酸の場合、強く発熱して沸騰する場合もあるので注意する必要がある[225]。

2.8.3.5　混触による反応

2 種またはそれ以上の物質が混合または接触したために、発火の危険を生じることである。以下のように分けることができる。

①　化学物質との混触による発熱･発火

強酸である濃硝酸は、強力な酸化剤でもある。濃硝酸が有機物と触れると、有機物が発火することがある[226]。

②　化学物質の混触による発火･爆発危険性混合物の生成

複数の化学物質を混合すると、熱、火炎、打撃、摩擦、衝撃に対して鋭敏な混合物ができることがある。典型的な例が花火である[227-230]。学園祭の準備あるいは学園祭での実演などのために、花火の製作中に発火した事例がある[231, 232]。

③　空気との接触による発熱･発火

常温の空気と接触した場合に、空気による酸化反応が急速に進行するものである。黄リン、モノシランが該当する。一部の金属は、ある程度以上の大きさの塊であれば、空気中で発火しないが、粉末の状態であれば、空気中で発火することがある。

④　水との接触による発熱･発火

2.8.3.4ですでに説明した。

地震火災の原因の中には、化学薬品が原因となったものがある。その多くは、化学薬品の混触による発火であると思われる[233-238]。表 12 に過去の地震における化学薬品による火災の件数を示す。ただし、大きな地震が発生した直後の火災の件数は資料により異なる。

化学薬品が原因となった火災の多くは、化学実験室等の薬品貯蔵庫や戸棚に置かれている薬品容器が地震動により転倒、落下、破損、流出し、上記の①から④の他に、引火

表 12　化学薬品が原因となった火災の件数[235, 236]

地震名	化学薬品が原因となった火災件数	全出火件数
関東大地震 (1923)	27	88
福井地震 (1948)	5	27
新潟地震 (1964)	3	12
十勝沖地震 (1968)	5	24
宮城県沖地震 (1978)	2	7
兵庫県南部地震 (1995)	2	157*

* 神戸市内における建物火災件数

表 13　温風が着火源となったと推定された事例

番号	年月	都道府県	概要	出典
9-1	1985.1	東京	7 時 13 分頃に耐火造 6 階の建物の 1 階車庫で、化粧品会社社員がワゴン車のエンジンを手動チョークをひいて始動し、暖気運転を行った。ワゴン車は、ガソリンを燃料とするもので、排気量は 1800 cc であった。エンジンが暖まった後、アイドリング回転にして、その場を離れた。自動車の排気管後方約 12 cm の所に、化粧品の箱が積んであった。排気の熱が当たり続けたことにより、ダンボールの温度が上昇し、ついに着火した。	270
9-2	1987.2	東京	9 時 42 分頃にマンション建築現場において、コンクリート作業車運転手は作業者を脇の道路上に駐車させ、車載のポンプを用いて生コンクリートの輸送作業を行っていた。エンジンは稼働しており、回転はアイドリング時より高まっていた。作業者の脇にはベニヤ板が積まれており、車体横腹に出ている排気口がごく接近していた。排気の熱が当たり続けたことにより、合板の温度が上昇し、ついに着火した。	270
9-3	1991.6	東京	建築工事現場で乾燥トイレの排気口付近から出火する火災があった。このトイレは、移動可能なもので、建築現場にレンタルされていた。尿を一次乾燥室で撹拌・乾燥させた後、2 次乾燥室に送り再加熱し、粉末状の残存物として集積し、一般ゴミとして処理する。処理工程で発生するアンモニア等のガスをヒーターで加熱し、触媒を通して無臭のガスとして大気に放出する。排気温度は、最高で 375 ℃に達した。乾燥トイレの設置場所上部の内壁に貼られていたダンボール紙が落下し、トイレの排気口をふさいだため、排気の温風によりダンボール紙が着火した。	101 271

性のある化学薬品の蒸気が、ガスバーナー、ガスストーブなどの裸火により着火されたことによると考えられる [233]。

大学の化学系の学部の研究室では、化学薬品以外に、装置類、ボンベ類、ガラス器具、書棚、OA 機器、実験動物などが置かれている。大きな地震が起こると、様々な被害が出る。被害に関する報告には、体験者にしか書けないことが掲載されており、参考になる [239-256]。

農薬の混合による発火危険性を指摘した報告もある [257-259]。農薬を安易に混合せずに、取扱説明書をよく読むことが期待される。

混触による発火が予測される化学物質の組み合わせについては、文献 260 に整理されている。ただし、全ての組み合わせが記載されているわけではないので、注意されたい。化学物質名で分類されているので、商品名しかわからないものについても注意が必要である。混触により、発火しなくても、毒性のあるガスを発生させる組み合わせもある [27]。

2.8.3.6　重合反応

重合反応により発熱する化学物質の中には、火災・爆発の原因となったものもある。

シアン化水素は保管中に、発熱を伴った重合し、爆発性の固形物質を形成することがある [261, 262]。そのため、高圧ボンベは長期間保存できない。塩化ビニルは発熱を伴って重合する。容器内で重合が急激に進むと、加速的に蒸気圧が上がり、容器が爆発する危険性がある [208]。ポリエステル樹脂の重合熱による火災 [263-266]、エポキシ樹脂の重合熱による火災 [267-269] も報告されている。

2.9　温風

可燃物が温風（高温の気体の流れ）に曝され続けた場合、可燃物が温風から受ける熱が、可燃物が周囲へ放出する熱よりも大きいと、可燃物の温度が上昇し、発火することがある [270, 271]。関係した事例を表 13 に示す。

3．おわりに

火災の着火源として、以下の 9 種、すなわち、1 衝撃・摩擦、2 断熱圧縮、3 高温表面、4 熱線、5 電気火花、6 静電気火花、7 裸火、8 自然発火、9 温風をあげ、事例を使って説明した。また、参考になりそうな資料もできるだけ引用した。火災原因調査の役に立てば幸いである。

火災原因調査の参考とするために、多くの文献を引用したが、一般の消防職員が、引用された文献に興味を持ったとしても、入手が困難かもしれない。ここでは、日本火災学会の「火災」誌から多数の文献を引用した。「火災」誌に掲載された全記事は、会員になるだけで Internet 上から読むことができることを付記しておく。

4．参考文献

1. 北川徹三：化学安全工学, pp. 95-129, 日刊工業新聞社, 1969
2. 北川徹三：基本安全工学，pp. 94-106，海文堂，1982
3. 駒井武，梅津実：摩擦火花によるガスへの着火，採鉱と保安，27 (12)，pp, 642-657, 1981
4. 阿部与，木下重教，中島巌：金属と岩石の摩擦によるメタンガスの着火に関する研究（第 1 報），日本鉱業会誌，835 (9)，No. 953, pp. 1077-1082, 1967
5. 木下重教，中島巌，岡本博之：金属と岩石の摩擦によるメタンガスの着火に関する研究（第 2 報），日本鉱業会誌，85 (5)，No. 973, pp. 325-332, 1969
6. 高岡三郎：衝撃火花の着火危険性，安全工学，4 (4),

pp.10 255-261, 1965

7. 東京消防庁渋谷署調査課 : 主任調査員からの報告 No. 201 タンクローリーの横転により出火した火災，東京消防，76 (10)，pp. 109-111, 1997
8. 東京消防庁予防部調査課 : 金属の火花等によるガソリンへの着火実験について，火災，47 (3)，pp. 31-35 , 1997
9. 鈴木仁治 : 擦過火花によるガソリンの発火，平成元年度日本火災学会研究発表会概要集，pp. 21-24, 1989
10. 鈴木仁治，田村陽介 : 車両火災の摩擦による発火に関する一考察，平成 9 年度日本火災学会研究発表会概要集，pp. 200-203, 1997
11. 名古屋市消防局（東消防署）: 木工丸鋸に起因する出火事例摩擦熱による出火機構の考察, 月刊消防, 3 月号, pp.6-21, 1990
12. 名古屋市消防局（東消防署）: 木工丸鋸に起因する出火事例 - 摩擦熱による出火機構の考察 -，東海望楼，2 月号，pp.61-64, 1990
13. 東京消防庁予防部調査課 : NC 旋盤からの火災 2 例，火災，45 (2)，pp. 58-60, 1995
14. 東京消防庁麻布署調査課 : 主任調査員からの報告 No. 319 エレベータワイヤーロープが一部破断して出火した火災，東京消防，86 (8)，pp. 92-95, 2007
15. 柴田功一（東京消防庁麻布消防署）: エレベータのワイヤーが一部破断して出火した火災，第 55 回全国消防技術者会議資料，pp. 21-26, 2007
16. 成田善雄，伊藤博 : 断熱圧縮による高圧酸素ガスの災害と防止対策，安全工学，6 (4)，pp. 278-283, 1967
17. 中村宏行，長坂徹，土屋茂 : 断熱圧縮現象によるガス温度上昇に関する数値解析とその検証 , 大陽日酸技報, No. 24, pp. 28-33, 2005
18. 駒宮功額 : 過剰酸素中の燃焼危険性と安全対策，産業安全研究所安全資料，RIIS-SD-72-1, 1973
19. 高圧ガス保安協会 : 高圧ガス事故に係る注意喚起 - 酸素の取り扱いについて (http://www.khk.or.jp) (Accessed on 25 June 2013)
20. 橋井一雄 : 酸素の基本的な性質と安全性, 紙パ技協誌, 39 (6) , pp. 538-550, 1985
21. ガス熔接・溶断作業の安全，第 4 版，中央労働災害防止協会，2006
22. 土屋茂 : 高圧酸素ガスの発火特性について - 試験及び解析の報告 -，高圧ガス，43 (8)，pp. 646-651, 2006
23. 土屋茂 : 高圧酸素中のバルブ開時の有機材料の発火，安全工学，46 (3)，pp. 144-149, 2007
24. 駒宮後額 : 酸素調整器の発火事故とその原因，火災，39 (3)，pp. 3-8, 1989
25. 徳永和彦 : 初心者でもわかる救急のポイント第 7 回資機材の安全使用（酸素を知る），月刊消防，31 (10)，pp. 40-43, 2009
26. 薩佐之久，鈴木豊 : 酸素に起因する事故事例 2 件の紹介，平成 3 年度日本火災学会研究発表会概要集，pp. 191-194, 1991
27. 内藤裕史 : 中毒百科 - 事例・病態・治療 -, 改訂第 2 版, 南江堂，2001
28. 武島玲子 : 病院内の医療ガス事故，茨城県立医療大学紀要，5, pp. 13-19, 2000
29. 森崎繁 : フッ素樹脂の酸化および燃焼，安全工学，18 (4)，pp. 199-204, 1979
30. 森崎繁 : エチレン - およびプロピレン - テトラフルオロエチレン共重合物の熱分解，日本化学会誌，No. 3, pp. 364-369, 1979
31. 高圧ガス保安協会 : 事故事例データベース（http://www.khk.or.jp）(Accessed on 25 June 2013)
32. 東京消防庁予防部調査課 : 酸素を使う器具からの出火 - 酸素吸入装置ボンベのバルブ焼損 -，近代消防，8 月号，pp.146-149, 1979
33. 赤塚広隆 : 事故に学ぶ酸素の容器弁・調整器の発火事故，高圧ガス，44 (3)，24-29, 2007
34. 赤塚広隆 : 高圧ガスの事故に学ぶ，p.118，高圧ガス保安協会，2012
35. 樋川貞夫，渡辺弘吉，池田恒彦，星野藤六 : 溶接火花の飛散範囲とガス着火，安全工学，5 (2)，pp.112-119, 1966
36. 東京消防庁調査課 : 溶接器等の火花による出火の危険性，近代消防，3 月号，No. 144, pp. 123-127, 1975
37. 石井勇五郎，加藤昇 : アーク溶接による火災について，火災，32 (5)，pp. 1-7, 1982
38. 萩原隆一，山野寛治，西田佳嗣 : 溶接火花による可燃物の着火危険，火災，32 (5)，pp. 8-12, 1982
39. 木下勝博，渡辺憲道，萩原安昭 : アーク溶接の際の可燃物への着火原因粒子の特定と着火特性，平成 7 年度日本火災学会研究発表会概要集，pp. 232-235, 1995
40. 切削工の使用上の注意事項，三菱マテリアル安全パンフレット（http://www.mitsubishicarbide.com）(Accessed on 19 June 2013)
41. 東京消防庁予防部調査課 : 特異火災事例，防災，No. 227, pp. 24-30, 1985
42. 神戸市消防科学研究所 : 電熱器具等による出火危険性について，消防科学と情報，No. 43, pp. 52-56, 1995
43. 栢植佑好他 : ミニクリプトン電球のガラス表面温度および着火危険性について，平成 8 年度日本火災学会研究発表会概要集，pp. 276-279, 1996
44. 栢植佑好，高尾基晴 : 大型照明電球のガラス表面温度および着火危険性について，平成 9 年度日本火災学

会研究発表会概要集，pp. 394-397, 1997
45. 東京消防庁予防部調査課：暮らしに生かした火災の原因 - ケーススタディー 119-，東京法令出版，1985
46. 金沢市消防本部予防課：煙突火災の実態と対策，月刊消防，9 月号，pp. 69-79, 1986
47. 東京消防庁予防部予防課：特異火災事例，防災，No. 233, pp. 26-30, 1986
48. 東京消防庁予防部予防課：低温着火による火災, 防災, No. 224, pp. 13-17, 1985
49. 火災調査研究会：火災から学ぶ－安全へのアプローチ－（車両火災事例集），東京法令出版，1996
50. 相川潔：消防職員のための車両の構造と車両火災調査のポイント第 2 回「高温の排気系統」, 月刊消防, 32(2), pp. 49-52, 2010
51. 東京消防庁予防部調査課：車両の燃料漏れによる発火機構，東京消防，74 (11)，pp. 20-24, 1995
52. 荒井康彰：電気溶接の伝導熱による船舶火災，横浜消防，12 月号，pp. 28-30, 1988
53. 東京消防庁予防部調査課：火災の実態
54. 名古屋市消防局 :2003 名古屋の火災，2004
55. 横浜市消防訓練センター研究開発課：タッチセンサーライトによる火災，月刊消防，7 月号，pp. 56-64, 1992
56. 東京消防庁予防部調査課：センサライトに起因した火災，火災，53 (3)，pp. 66-69, 2003
57. 上田和功：センサライトに起因する火災について，第 51 回全国消防技術者会議資料，pp. 27-31, 2003
58. 福地孝宏：中学理科の物理学，pp. 96-97，誠文堂新光社，2011
59. 小口正七：火をつくる - 発火具の変遷 -, p. 23, 裳華房, 1991
60. 東京消防庁東村山署：マスコット用吸盤による出火危険，東京消防，57 (7)，pp. 50-51, 1978
61. 東京消防庁予防部調査課：特異な火災事例 3 題，建築防災，3 月号，pp. 13-24, 1984
62, 東京消防庁予防部調査課：特異な火災事例，防災，4 月号，pp. 26-30, 1984
63. 大槻忠義（神戸市消防局）：火災事例透明プラスチック製肩叩き棒による収れん火災，月刊消防，23 (6)，pp. 35-40, 2001
64. 東京消防庁目黒署調査課：主任調査員からの報告 No. 241 出窓に置いたガラス製置物による収れん火災，東京消防，80 (2)，pp. 111-113, 2001
65. 東京消防庁世田谷署調査課：主任調査員からの報告 No. 123 ウォーターアレイ（筋力トレーニング用）による収れん火災，東京消防，70 (4)，pp. 173-174, 1991
66. 福島県警察本部鑑識課：雨水が放火の犯人であったとはビニール・ハウスの特異火災事例，近代消防，10 月号，pp. 170-173, 1968
67. 福島市消防本部福島消防署：ビニールハウス屋根の雨水〈凸レンズ作用〉による出火危険，近代消防，5 月号，pp. 95-104, 1987
68. 福﨑悟：収れん火災の調査について，第 58 回全国消防技術者会議資料，pp. 116-122, 2010
69. 相馬地方広域消防本部：無人のビニールハウス内で発生した「収れん」による火災事例, 近代消防, 4 月号, pp. 72-75, 2013
70. 国民生活センター：アルミホイールによる収れん火災に注意！－メッキ処理された凹面鏡のようなホイールについて－（http://www.kokusen.go.jp）（Accessed on 1 Aug 2013）
71. 東京消防庁調査課：太陽熱による火災，近代消防，5 月号，pp.124-131, 1972
72. 東京消防庁予防部調査課：ペットボトルが太陽光を収束し発生した収れん火災，火災，60 (6)，pp. 58-61, 2010
73. 廣田勲：ペットボトルが太陽光を収束し発生した収れん火災，第 59 回全国消防技術者会議資料，pp. 86-90, 2011
74. 東京消防庁調査課：主任調査員からの報告 No. 171 反響を呼んだペットボトルの火災ほか 1 件，東京消防，74 (5)，pp. 183-185, 1995
75. 福岡市消防局南消防署：ペットボトルの「収れん」による火災事例について，消防科学と情報，No. 94, pp. 56-64, 2008
76. 福岡県瀬高町外二町消防組合：化粧用凹面鏡が発火源, 近代消防，5 月号，pp. 145-147, 1976
77. 豊中市消防本部北消防署：冬至特有の火災について, ほのお，12 号，pp. 16-17, 1985
78. 鈴木直美：凹面鏡の収れん作用による出火事例について，横浜消防，3 月号，pp. 19-24, 1987
79. 千葉市消防局警防部予防課：留守中に太陽熱ゆで卵作り器から出火，近代消防，3 月号，pp. 68-70, 1995
80. 東京消防庁池袋署調査課：主任調査員からの報告 No. 302 スチール製ボールによる収れん火災，東京消防，3 月号，pp. 93-97, 2006
81. 川崎市消防局：ステンレス製のボール容器の収れんによる火災事例について，消防科学と情報，No, 77, pp. 70-74, 2004
82. 東京消防庁調査課：主任調査員からの報告 No. 96 鏡面仕上げの外壁板に起因する収れん火災，東京消防，68 (2)，pp. 137-138, 1989
83. 東京消防庁予防部調査課：収れん火災，消防科学と情報，No. 21, pp. 36-40, 1990
84. 東京消防庁予防部調査課：主任調査員からの報告 No.

161 凹面状外壁の熱線反射ガラスによる収れん火災 , 東京消防, 73 (6), pp. 157-159, 1994
85. 東京消防庁予防部調査課 : 太陽光線の収れんによる火災, 火災, 44 (4), pp. 57-60, 1994
86. 東京消防庁予防部調査課 : 主任調査員からの報告 No. 84 サンルームの屋根内面に貼られたフィルムによる収れん火災, 東京消防, 67 (2), pp. 141-142, 1988
87. 東京消防庁（監修）: 新火災調査教本, 第6巻, p. 135, 東京防災指導協会, 2003
88. 国立天文台（http://www.nao.ac.jp）（Accessed 3 August 2013）
89. 大竹祐吉 : 増補改訂版市販レーザ装置活用のためのレーザの使い方と留意点, オプトロニクス社, 1989
90. 厚生労働省 : レーザー光線による障害の防止対策について, 基発第 0325002 号, 平成 17 年 3 月 25 日（http://www.mhlw.go.jp）（Accessed on 29 July 2013）
91. レーザ製品の安全基準, JIS C6802:2005
92. 日本鍛圧機械工業会 : レーザ加工機取扱作業者用安全講習テキスト（http://www.j-fma.or.jp）（Accessed on 29 July 2013）
93. 大橋直樹他 : レーザーの挿管チューブに対する安全性の検討, 日気食会報, 35 (5), pp. 361-365, 1984
94. 法貴昭 : レーザー適応の問題点, 日気食会報, 38 (2), pp. 140-145, 1987
95. 医薬品医療機器総合機構 : 平成 21 年度第 3 回医薬品・医療機器安全使用対策検討会結果報告（http://www.pmda.go.jp）（Accessed on 29 July 2013）
96. 医薬品医療機器総合機構 : 平成 22 年度第 1 回医薬品・医療機器安全使用対策検討会結果報告（http://www.pmda.go.jp）（Accessed on 29 July 2013）
97. 医薬品医療機器総合機構 : 平成 23 年度第 3 回医薬品・医療機器安全使用対策検討会結果報告（http://www.pmda.go.jp）（Accessed on 29 July 2013）
98. 中山崇他 : 層流予混合気におけるレーザ着火過程の高時間分解光学計測, 日本機械学会論文集（B 編）, 74, pp. 1633-1640, 2008
99. 谷口正行他 : レーザで着火した微粉炭粒子群の燃焼特性, 日本機械学会論文集（B 編）, 62, pp. 3481-3487, 1996
100. 東京消防庁東調布署調査課 : 主任調査員からの報告 No. 115 ダウンライトに起因する火災, 東京消防, 69 (10), pp. 151-152, 1990
101. 東京消防庁火災調査研究会編 : 火災から学ぶ - 安全へのアプローチ - 電気火災事例集, 東京法令出版, 1992
102. 河合晴夫 : スポットライトによる舞台幕及び大道具類の燃焼性試験について, 名古屋市消防局消防研究室年報, No. 23, pp. 19-28, 1994
103. 京都市消防局警防部消防防災課 : 最近の特異火災から（その 2）（レーザービームによる火災について）, 消防科学と情報, No. 10, pp. 26-27, 1987
104. 京都市消防局警防部消防防災課 : レーザービームによる火災（上）, 近代消防, 11 月号, pp. 141-146, 1987
105. 京都市消防局警防部消防防災課 : レーザービームによる火災（下）, 近代消防, 12 月号, pp. 146-151, 1987
106. 名古屋市消防局消防部 : レーザーによる長距離照射火災事例について, 近代消防, 11 月号, pp. 50-53, 1995
107. 熊谷清一郎 : 火, 岩波新書（黄版）92, 岩波書店, 1979
108. 新岡嵩 : 燃える - ろうそくからロケットの燃焼まで -, オーム社, 1994
109. 平野敏右 : 燃焼学 - 燃焼現象とその制御 -, 海文堂, 1986
110. 榎本兵治他 : 粉じん爆発 - 危険性評価と防止対策 -, オーム社, 1991
111. 藤田嘉美 : 可燃性ガスの対策, 電設技術, 11 月号, pp. 35-38, 2003
112. 労働省産業安全研究所 : 工場電気設備防爆指針（ガス蒸気防爆 1979）, 産業安全研究所技術指針, RIIS-TR-79-1, 1979
113. 労働省産業安全研究所 : 新・工場電気設備防爆指針（ガス防爆 1985）, 産業安全研究所技術指針, RIIS-TR-85-1, 1985
114. 労働安全衛生総合研究所 : 工場電気設備防爆指針（国際規格に整合した技術指針 2008）, 労働安全衛生総合研究所技術指針, JNIOSH-TR-No. 43, 2008
115. 労働安全衛生総合研究所 : ユーザーのための工場防爆設備ガイド, 労働安全衛生総合研究所指針, JNIOSH-TR-No. 44, 2012
116. 萩本安昭, 渡邉憲道, 岡本勝弘, 千明慎臣 : 電気配線の短絡箇所から飛散する火花粒子による可燃物の着火危険, 平成 19 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 140-141, 2007
117. 萩本安昭, 渡邉憲道, 岡本勝弘, 政野亮二 : 火災原因としての短絡火花エネルギー, 平成 18 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 404-407, 2006
118. 萩本安昭, 渡邉憲道, 岡本勝弘, 三浦仁 : 火災原因としての電気火花と位相制御回路による再現性改善, 平成 17 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 310-313, 2005
119. 安全工学協会 : 改訂安全工学便覧, コロナ社, 1980
120. 堤井信力 : 静電気の ABC, ブルーバックス B-1213, 講談社, 1998

121. 炭谷不二男 : 可燃性液体ハンドリング工程における静電気対策，安全工学，20 (6)，pp. 340-345, 1981
122. 北川徹三 : 爆発火災原因としての静電気，静電気学会誌，2, p. 1, 1978
123. 松原美之 : 静電気災害・障害第I講災害・障害につながる静電気現象の基礎，静電気学会誌，12 (1)，pp. 61-68, 1988
124. 松原美之 : 静電気災害・障害第IV講静電気放電と着火・爆発，静電気学会誌，12 (4)，pp. 292-299, 1988
125. 松原美之 : 可燃性液体充填時の静電気危険と対策，静電気学会誌，15 (2)，pp. 117-124, 1991
126. 松原美之 : 可燃性液体ハンドリング時の静電気災害，静電気学会誌，18 (3)，pp. 254-255, 1994
127. 松原美之 : 危険物の取扱いと静電気災害，KHKだより，No. 51, pp. 2-11, 1996
128. 相田和男 : 給油取扱所の事故事例について(その1)，KHKだより，No. 43, pp. 32-43, 1994
129. 浅野和俊 : 静電気を原因とする火災 – セルフスタンド事故を例として –，火災，54 (1)，pp. 48-55, 2004
130. 浅野和俊 : 静電気を原因とする火災 – セルフスタンド事故を例として –，Safety & Tomorrow, No. 99, pp. 7-16, 2005
131. Ulrich von Pidoll (長谷川和俊訳) : 自動車の静電気着火危険 – 発生，検知および回避 – (抄訳)，Safety & Tomorrow, No. 99, pp. 17-24, 2005
132. 山隈瑞樹 : 最近の静電気による爆発・火災事例，静電気学会誌，36 (3)，pp. 116-121, 2012
133. 労働省産業安全研究所 : 静電気安全指針，産業安全研究所技術指針，RIIS-TR-87-1, 1988
134. 労働安全衛生総合研究所 : 静電気安全指針 2007, JNIOSH-TR-NO.42, 2007
135. 樺山紘一他（編集）: 火の百科事典火・熱・光 - プロメテウスからロケットまで，pp. 603-606, 丸善 , 1999
136. 島谷晴朗 : ろうそくのろうは燃えているの？ - 子どもの発想を燃焼授業の導入に -，化学と教育，42 (1)，pp. 6-8, 1994
137. 研究課 : 実験室レポート No.11 アロマセラピーの謎，京都消防，4月号，pp. 38-39, 1999
138. 京都市消防学校研究課 : アロマセラピーの謎，月刊消防 , 22 (1)，pp. 81-86, 2000
139. 片桐勝治 : 身近な出火危険 - 天然油脂ワックスの自然発火性及びアロマセラピーの異常燃焼メカニズム -，第47回全国消防技術者会議資料，pp. 91-96, 1999
140. 奥谷博司，片桐勝治 : アロマセラピーの異常燃焼メカニズムについて，京消研究レポート集，17, pp. 25-30, 2000
141. 桂敏美 : 突然燃え上がる！茶香炉（アロマセラピー）のナゾ解明（上），月刊消防，25 (6)，pp. 15-23, 2003
142. 桂敏美 : 突然燃え上がる！茶香炉（アロマセラピー）のナゾ解明（中），月刊消防，25 (7)，pp. 15-21, 2003
143. 桂敏美 : 突然燃え上がる！茶香炉（アロマセラピー）のナゾ解明（下），月刊消防，25 (8)，pp. 55-60, 2003
144. 神戸市消防局予防部予防課調査係 : 茶香炉からの火災事例，消防科学と情報，No. 82, pp. 62-66, 2005
145. 名古屋市消防局守山消防署 : アロマセラピー関連製品の出火危険について，近代消防，9月号，pp. 64-71, 1999
146. 名古屋市天白消防署消防第二課 : 素焼きキャンドルに起因する火災事例，月刊消防，6月号，pp. 85-88, 1997
147. 東京消防庁予防部調査課 : ローソク火災の調査について，東京消防，59 (9)，pp. 155-156, 1980
148. 京都市消防局 : ローソクの燃焼性状等について，京消研究レポート集，7, pp. 51-77, 1987
149. 研究課 : 実験室レポート No. 8 ろうそくの怖さ，京都消防，10月号，pp. 32-33, 1998
150. 東京消防庁予防部調査課 : 大量生産・大量販売製品の火災調査，東京消防，59 (11)，pp. 139-140, 1980
151. 名古屋市消防局緑消防署 : 携帯用簡易ガスライターの出火危険について，近代消防，8月号，pp. 121-130, 1993
152. 国民生活センター : やけど等につながる簡易ライターからの発火（http://www.kokusen.go.jp）(Accessed on 1 Aug 2013)
153. 国民生活センター : 危害情報から見たライターの事故～突然火が出た、やけどをしたなど～（http://www.kokusen.go.jp）(Accessed on 1 Aug 2013)
154. 大阪市消防局 : 調査鑑識レポートライターに起因する火災事例について，大阪消防，9月号 , pp. 14-15, 2009
155. 消防庁 : 危険物に係る事故事例 (平成22年) 火災編，pp. 136-137
156. 消防庁 : 危険物に係る事故事例 (平成15年) 第1分冊，pp. 274-275
157. 新居六郎 : 種々の条件におけるたばこの燃焼特性について，消防研究所報告，6 (1)，pp. 1-11, 1955
158. 萩本安昭，木下勝博 : たばこ火による可燃性混合気への着火危険性，安全工学，20 (4)，pp. 197-202, 1981
159. 萩本安昭 : たばこは発火源になるか，予防時報，134号，pp. 38-43, 1983
160. 増尾裕 : たばこの燃焼，予防時報，91号，pp. 19-25, 1972
161. 名古屋市消防局 : たばこ火災の防止について，消防

研究室年報，No. 11, pp. 8-20, 1980
162. 田中三宏 : 無風時における煙草の危険性について，火災，9 (2)，pp. 92-95, 1959
163. 樫村利明，後藤繁，伏見英 : たばこによる着火機構について，東京消防庁消防科学研究所報，7, pp. 34-45, 1970
164. 奥谷博司 : たばこ火のダンボール紙への着火性・燃焼性について（その 1），京消研究レポート，17, pp. 54-66, 2000
165. 園田悟朗 : 使い捨てカイロ，日本機械学会誌，112, pp. 474-475, 40 2009
166. 吉田利三郎 : 発熱体の概要，繊維と工業，36 (7)，pp. 286-289, 1980
167. 京都市消防局 : 自然発火について，京消研究レポート集，15, pp. 27-51, 1997
168. 東京消防庁予防部調査課 : 特異出火原因の事例と対策①モノシランの火災事例，近代消防，2 月号，pp.29-34, 1995
169. 東京消防庁予防部調査課 : 特殊材料ガス（モノシラン）の災害事例，火災，40 (6)，pp. 28-33, 1990
170. 大岩守（名古屋市南消防署）: 特殊材料ガスの安全（上），月刊消防，4 月号，pp. 140-151, 1986
171. 大岩守（名古屋市南消防署）: 特殊材料ガスの安全（下），月刊消防，5 月号，pp. 85-93, 1986
172. 高圧ガス保安協会 : 事故事例で学ぶ特殊高圧ガス（モノシラン等）取扱中の爆発・火災とその教訓，2000
173. 美浦義明 : 石炭の風化および貯炭，燃料協会誌，58, pp.112-122 (1979)
174. 星沢欣二，小谷田一男，小野哲夫 : 石炭貯蔵時の炭じん飛散および自然発火，燃料協会誌，64 (4)，pp. 224-239 (1985)
175. 原田一郎 : 改訂増補油脂化学の知識, 第 3 版, 幸書房, p. 132, 1992
176. 清水忠男 : 動植物油 (亜麻仁油, いか油 (原油), 鯨油) の自然発火について，火災，6 (1)，pp. 43-44, 1956
177. 西岡博治 : 塗料用油の浸みた繊維類の自然発火について，色材協会誌，33 (4)，pp. 180-182, 1960
178. 大阪市消防学校防災研究係 : ボイル油のしみ込んだウェスからの出火，防災研究レポート，pp. 25-26, 2001
179. 消防学校防災研究係 : ボイル油のしみ込んだウエスからの出火，大阪消防，7 月号，p. 71, 2001
180. 横浜市消防局災害調査課 : 自然発火事例 2 題，火災，39 (1)，pp. 44-45, 1989
181. 消防学校防災研究係 : チークオイルのしみ込んだウエスの自然発火による出火，大阪消防，8 月号，pp. 36-37, 1999
182. 消防学校防災研究係 : 鯨油のしみ込んだタオルの自然発火，大阪消防，7 月号 , p. 40, 1998
183. 東京消防庁高輪消防署 : 油絵用絵の具がしみ込んだ布（タオル）の自然発火はあり得るか～鑑定および実験を実施～，月刊消防，9 月号，pp. 72-77, 1996
184. 勝倉忠男 : 油絵具の画溶液を拭き取った布から出火した火災，第 48 回全国消防技術者会議資料，pp. 123-127, 2000
185. 東京消防庁予防部調査課 : 主任調査員からの報告 No. 178 切削油として使用された醤油油の自然発火，東京消防，74 (12)，pp. 105-106, 1995
186. 山本祐子 : 廃棄した植物油が自然発火した火災，第 55 回全国消防技術者会議資料，pp. 15-20, 2007
187. 東京消防庁調査課 : 梅雨時のコインランドリー乾燥にご用心コインランドリーの乾燥機が起因する出火事例，ほのお，6 (6)，No. 60, pp. 9-10, 1980
188. 東京消防庁消防科学研究所第二研究室 : 加熱衣類の自然発火について－コインランドリー火災からの考察－，火災，30 (4)，pp. 50-53, 1980
189. 東京消防庁本田署 : 加熱乾燥衣類の自然発火実験，東京消防，59 (8)，pp. 34-41, 1980
190. 東京消防庁予防部調査課 : 主任調査員からの報告 No. 308 魚油の酸化発熱反応により出火した火災，東京消防，85 (9)，pp. 109-112, 2006
191. 渡辺正道 : 綿繊維の自然発火事例及び実験結果について，横浜消防，8 月号，pp. 20-23, 1990
192. 消防学校 : 鑑識レポートエステティックサロンのタオルが自然発火した火災，大阪消防，4 月号，p. 49, 2000
193. 老沼康弘 : エステサロンで使用されたタオルの火災について，第 53 回全国消防技術者会議資料，pp. 33-38, 2005
194. 京都市消防局 : エステオイルの発熱の可能性について，京消研究レポート集，22, pp. 31-38, 2005
195. 東京消防庁監修 : 火災原因調査－主任調査員からの報告－，p. 43, 東京防災救急協会，2010
196. 東京消防庁神田消防署 : 揚げ玉・揚げかすの自然発火，月刊消防，11 (8)，pp.72-76, 1989
197. 石田純，佐藤清仁 : 揚げ玉の自然発火に関する調査研究，第 51 回全国消防技術者会議資料，pp. 51-56, 2003
198. 東京消防庁予防部調査課 : 特異火災事例，防災，12 月号，No. 221, pp. 22-27, 1984
199. 東京消防庁調査課 : セルロイドの自然発火例，火災，37 (1)，pp.36-42, 1987
200. 東京消防庁京橋署 : 東京国立近代美術館フィルムセンター火災の概要，東京消防，53 (11)，pp. 20-27,

1984
201. 東京消防予防部調査課 : 主任調査員からの報告 No. 114 セルロイドの自然発火火災，東京消防，69 (9)，pp. 147-148, 1990
202. 駒宮功額 : 技術発展と事故 -21 世紀の「安全」を探る -，p. 111，中災防新書 006, 2002
203. 14303 の化学商品，化学工業日報社，2003
204. 厚木勝基 : セルロイド，有機合成化学協会誌，9 (8)，pp. 144-148, 1951
205. 岡田秀則 : ナイトレート・フィルムの保存，マテリアルライフ学会誌，16 (2)，pp. 41-46, 2004
206. 神奈川県高圧ガス協会 : 高圧ガス要覧，2004
207. 東京都高圧ガス保安協会 : 高圧ガスの取扱いかた，3 版，2006
208. 日本化学会編 : 化学防災指針集成，丸善，1996
209. 広島市消防局 : 広島山上産業火災ボンベ爆発事故概況死のアセチレンボンベ，近代消防，7 月号，pp. 66-70, 1967
210. 福山郁生 : 有機過酸化物の事故例，Explosion, 2 (2)，pp. 119-127, 1999
211. 幅道雄 : 有機過酸化物の火災事故例の推移と分析，安全工学，41 (3)，pp. 190-198, 2002
212. 幅道雄 : 有機過酸化物の火災事故の調査と対策，Safety & Tommorrow, No. 91, pp. 55-62, 2003
213. 幅道雄 : 樹脂製造工場における有機過酸化物事故事例の調査と対応策 , 安全工学，43 (2)，pp. 89-95, 2004
214. ブレズリック (田村昌三監訳) : 危険物ハンドブック，第 5 版，丸善，1998
215. 林俊勝，張田俊宏 : 発酵熱からの出火に関する考察，近代消防，7 月号 , pp. 28-33, 1989
216. 駒宮功額 : 事例に見る意外な火災・爆発, 火災, 43(2)，pp. 13-19, 1993
217. 南十勝消防本部 : 牧草の自然発火，ほのお，6 (8)，No. 62, pp. 14-16, 1980
218. 南十勝消防事務組合大樹消防署 : 自然出火による干草収納庫火災，近代消防，1 月号，pp. 164-167, 1978
219. 糸島郡消防厚生施設組合 : サイロ火災による爆発火 30 災，ほのお，17 (1)，No. 187, pp. 9-11, 1991
220. 青木繁樹，中原万次郎 : 生石灰の水和と自硬性，石膏と石灰，No. 73, pp. 227-232, 1964
221. 金坂武雄 : 土質安定剤の火災危険性, 安全工学, 13(1)，pp. 48-56, 1974
222. 古川和男，井口八枝 : 原子力開発のための液体ナトリウム技術と防災，安全工学，6 (1)，pp. 1-11, 1967
223. 北川徹三，小木曾千秋 : 液体ナトリウムの発火および燃焼現象の研究，安全工学，7 (1)，pp. 31-36, 1968
224. 日本原子力研究所 : 液体ナトリウム安全取扱指針，JAERI6019, 1968
225. 飯田他 : イラストで見る化学実験の基礎知識，丸善，2003
226. 宮下繁 : 硝酸による出火事例について, 火災, 18 (1)，pp. 33-37, 1968
227. 小勝郷右 : 花火 - 火の芸術，岩波新書（黄版）237，岩波書店，1983
228. 細谷政夫，細谷文雄 : 花火の科学，東海大学出版会，1999
229. 吉田忠雄，丁大玉 : 花火学入門，プレアデス出版，2006
230. 吉田忠雄，丁大玉 : 花火学の科学と技術，プレアデス出版，2013
231. 橋本孔作（東京消防庁予防課）: 化学実験室の災害，安全工学，7 (4)，pp. 329-334, 1968
232. 竹林保次他 : 学校における化学実験事故とその対策，化学教育，13 (3)，pp. 373-395, 1965
233. 東京消防庁防災部防災課 : 化学薬品の出火危険度評価と地震対策 – 火災予防審議会答申の概要（その 1）–，火災，31 (3)，pp. 43-51, 1981
234. 大内博史，吉田忠雄 : 地震時における薬品等の混触発火の危険性，予防時報，131 号，pp. 32-37, 1982
235. 吉田忠雄編 : 化学薬品の安全，大成出版社，1982.
236. 神戸市消防局 : 神戸市における地震火災の研究，東京法令出版，1996
237. 樫村利明他 : 地震による危険物の混合危険等に関する実験報告，消防科学研究所報，7, pp. 46-73, 1970
238. 川茂隆 : 薬品の混触による発火実験，防火管理，3 月号，pp. 43-46, 1973
239. 池上雄作 : 速報 “ 化学実験室の地震 ”– 宮城県沖地震の被害を取材して –，化学と工業，31 (7)，pp. 558-560, 1978
240. 池上雄作 : 化学実験室の地震対策 – 宮城県沖地震の教訓を生かして –，化学と工業，31 (12)，pp. 1001-1005, 1978
241. 瀬恒潤一郎 : 激震地神戸からの報告 – 神戸大学化学系教室での事例 –，化学と工業，48 (6)，pp. 699-700, 1995
242. 佐々木宗夫，辻治雄 : 激震に見舞われた化学教室 – 神戸市・甲南大学 –，化学と工業，48 (6)，pp. 704-705, 1995
243. 海崎純男 : 化学実験室における地震対策の有効性と限界 – 阪神淡路大震災から何を学べるか – 大阪大学理学部 –，化学と工業，48 (6)，pp. 708-709, 1995
244. 指方研二，尾形孝輔 : 石巻専修大学の例 – 一体何が大学を守ったのか –，化学，12 月号，pp. 12-16, 2011
255. 現代化学編集グループ : 研究室を地震から守には –

東日本大震災の教訓－，現代化学，9月号，pp. 30-41, 2011
256. 笠井憲雪他：体験者が伝える実験動物施設の震災対策，アドスリー，2011
257. 小木曽千秋，北川徹三，野尻忠弘，上原一雄：農薬の混合による発火危険性の研究，安全工学，9 (6)，pp. 339-349, 1970
258. 東京消防庁警防部調査課：農薬の火災危険について，火災，20 (4)，pp. 209-222, 1970
259. 横浜市消防局：火災現場に残存した農薬の自然発火について，防災研究，No. 15, pp. 74-77, 1985
260. 東京消防庁編，吉田忠雄，田村昌三監修：化学薬品の混触危険ハンドブック，第2版，日刊工業新聞社，1997
261. 数森敏郎：新版高圧ガス工学，日刊工業新聞社，1965
262. 日本化学会：防災指針No.81 シアン化水素(改訂版)，化学と工業，31 (2)，pp. 155-162, 1978
263. 宇佐見晃：ポリエステル樹脂塗料と硬化剤の混合発火危険，名古屋市消防局消防研究室年報，No. 29, pp. 44-47, 2000
264. 東京消防庁予防部調査課：防水用塗料の重合熱により出火した火災，火災，49 (4)，pp. 63-66, 1999
265. 東京消防庁予防部調査課：防水用塗料の重合熱による火災，火災，53 (1)，pp. 61-64, 2003
266. 小清水雄二：防水用塗料の重合熱による火災について，第51回全国消防技術者会議資料，pp. 15-20, 2003
267. 横浜市消防局計画課：火災発生事例，火災，40 (1)，pp. 60-61, 1990
268. 東京消防庁予防部調査課：エポキシ樹脂の火災，火災，46 (4)，pp. 58-59, 1996
269. 東京消防庁青梅署調査課：主任調査員からの報告No. 190 エポキシ樹脂の火災，東京消防，75 (11)，pp. 107-108, 1996
270. 東京消防庁予防部調査課：危険を読む⑬自動車の排気熱による火災，近代消防，1月号，pp. 153-155, 1988
271. 東京消防庁渋谷署調査課：主任調査員からの報告No. 129 簡易式乾燥トイレの火災，東京消防，70 (10)，pp. 161-162, 1991
272. 通商産業省立地公害局(監修)，高圧ガス保安協会(編集)：高圧ガス事故事例集，高圧ガス保安協会，1982

Ignition Sources of Fires

(Abstract)

Takeshi Suzuki

(Accepted February 18, 2014)

It is necessary to know a fire's source of ignition for fire investigation. Such knowledge also enables prevention of future fires from the same or similar causes. A list of ignition sources follows:
1. Heat from impact and friction
2. Adiabatic compression
3. Heated surface
4. Energy of light
5. Electric spark
6. Static electricity
7. Open flame
8. Spontaneous ignition
9. Hot gas flow
Details of ignition sources are described. It is hoped that this report is of help for fire investigation.

所外発表論文

目　次

－おことわり－
ここに掲載されている論文は、他機関の発行する雑誌等から転載されたものであるためインターネット上では公開しておりません。
これらの論文の閲覧を希望される方は消防研究センターまでお問い合わせください。

Articles of Staff of NRIFD Published by Outside Organizations

Contents